

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов и автотрансформаторов определяются на основе каталожных данных. Для двухобмоточных трансформаторов используются следующие каталожные данные:

номинальная мощность трансформатора,  $S_{т ном}$ ;

напряжение обмотки высокого напряжения,  $U_{вн}$ ;

напряжение обмотки низкого напряжения,  $U_{нн}$ ;

потери активной мощности в режиме короткого замыкания,  $\Delta P_k$ ;

напряжение короткого замыкания,  $u_k$ ;

потери активной мощности в режиме холостого хода,  $\Delta P_x$ ;

ток холостого хода,  $I_x$ .

Номинальной называют мощность трансформатора, которой он может быть нагружен при номинальных температурных условиях охлаждающей среды.

Номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток - это напряжения между выводами обмоток при холостом ходе трансформатора.

В режиме короткого замыкания (КЗ) одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а по другой протекает ток, равный номинальному, при некотором приложенном напряжении  $u_k$ , которое и называется напряжением короткого замыкания. Оно меньше номинального и выражается в процентах от него отношением:

$$u_{k,\%} = \frac{u_k}{U_{\text{бн}}} 100\%. \quad (28)$$

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, практически целиком расходуется на нагрев его обмоток, а потери в стали ничтожны из-за малого значения приложенного напряжения  $u_k$ , т.к. потери в стали пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому приближенно считают, что все потери мощности в опыте КЗ  $\Delta P_k$  идут на нагрев обмоток трансформатора, т.е.:

$$\Delta P_k = 3I_{\text{ном}}^2 \cdot R_m = \frac{S_{\text{м ном}}^2}{U_{\text{бн}}^2 \cdot R_m}, \quad (29)$$

где  $R_m$  - активное сопротивление трансформатора.

В режиме холостого хода первичная обмотка включается на номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Потребляемый из сети ток называется током холостого хода. Он выражается в процентах от номинального тока первичной обмотки, *I<sub>в ном</sub>*:

$$I_{x,\%} = \frac{I_x}{I_{\text{в ном}}} 100\%. \quad (30)$$

$$\underline{\Delta S}_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x. \quad (31)$$

Состав каталожных данных для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов имеет следующие отличия от перечисленных выше.

Для трехобмоточных трансформаторов указывают напряжения всех трех обмоток: высокого  $U_{вн}$ , среднего  $U_{сн}$ , низкого  $U_{нн}$ , а также соотношение мощностей обмоток в процентах от  $S_{ном}$ :  $100/100/100\%$ ;  $100/100/66,7\%$  или  $100/66,7/66,7\%$ .

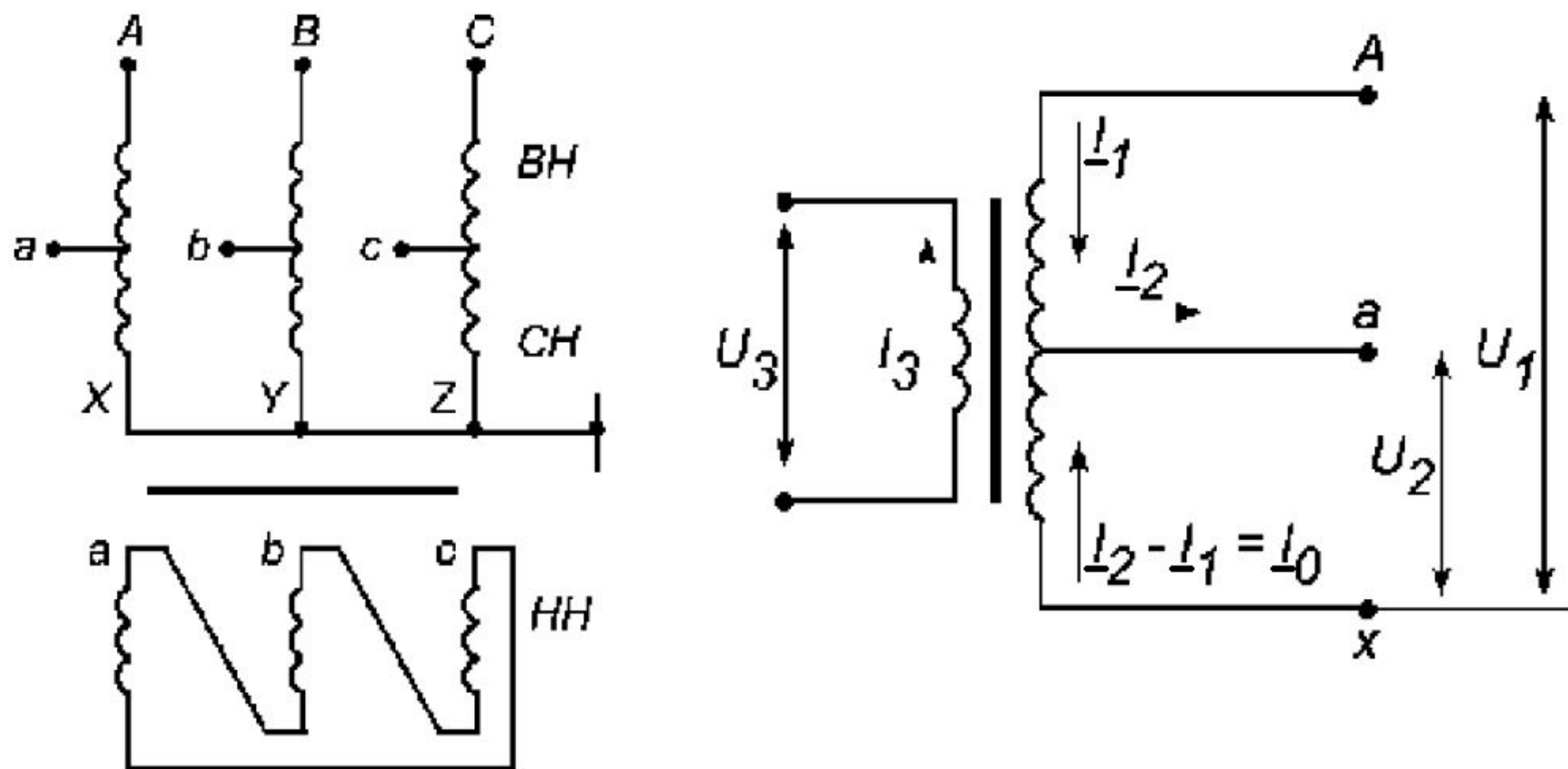
Если мощности обмоток неодинаковы, то даются три значения потерь мощности короткого замыкания:  $\Delta P_{к, в-н}$ ;  $\Delta P_{к, с-н}$ ;  $\Delta P_{к, в-с}$ , %, каждое из которых соответствует опыту для двух обмоток (третья разомкнута), и при этом указанные значения отнесены к номинальной мощности менее мощной обмотки.

Указываются три относительных значения напряжения короткого замыкания:  $u_{к, в-н}$ ;  $u_{к, в-с}$ ;  $u_{к, с-н}$ , %, так как для трехобмоточных трансформаторов режим КЗ выполняется для всех возможных сочетаний обмоток. При этом если мощности обмоток не одинаковы, то приводимые значения отнесены к номинальному току менее мощной обмотки.

Паспортные данные трансформаторов с расщепленной обмоткой такие же, как и у двухобмоточных.

Автотрансформаторы изготавливаются на номинальное напряжение 150 ÷ 750 кВ и применяются для связи электрических сетей и их элементов, когда не требуется большой коэффициент трансформации,  $K_{AT}$ . У большинства автотрансформаторов  $K_{AT} \leq 2$ .

Все автотрансформаторы имеют соединение трех фаз обмоток ВН и СН в звезду и образуют общую для обоих напряжений нулевую точку, заземляемую наглухо (рис. 5). У автотрансформатора обмотки ВН ( $AX$ ) и СН ( $aX$ ) электрически связаны, а обмотка НН имеет с обмотками ВН и СН обычную трансформаторную связь. Часть фазной обмотки, заключенная между выводами  $A$  и  $a$  ( $B$  и  $b$ ,  $C$  и  $c$ ), называется последовательной, а между выводами  $a$  и  $X$  ( $b$  и  $Y$ ,  $c$  и  $Z$ ) - общей.



*Схема соединений обмоток автотрансформатора*

Здесь  $\underline{I}_1$  - ток последовательной обмотки, магнитный поток которого наводит в общей обмотке ток  $\underline{I}_0$ , равный

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_2 - \underline{I}_1, \quad (32)$$

где  $\underline{I}_2$  - ток вторичной цепи.

У понижающих автотрансформаторов мощность последовательной обмотки называется типовой  $S_m$  и равна мощности общей обмотки:

$$S_m = \sqrt{3}I_1 \cdot (U_1 - U_2) = \sqrt{3}(I_2 - I_1) \cdot U_2; \quad (33)$$

$$S_m = \sqrt{3}I_1 \cdot U_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) = S_{AT\text{ ном}} \left(1 - \frac{1}{K_{AT}}\right), \quad (34)$$

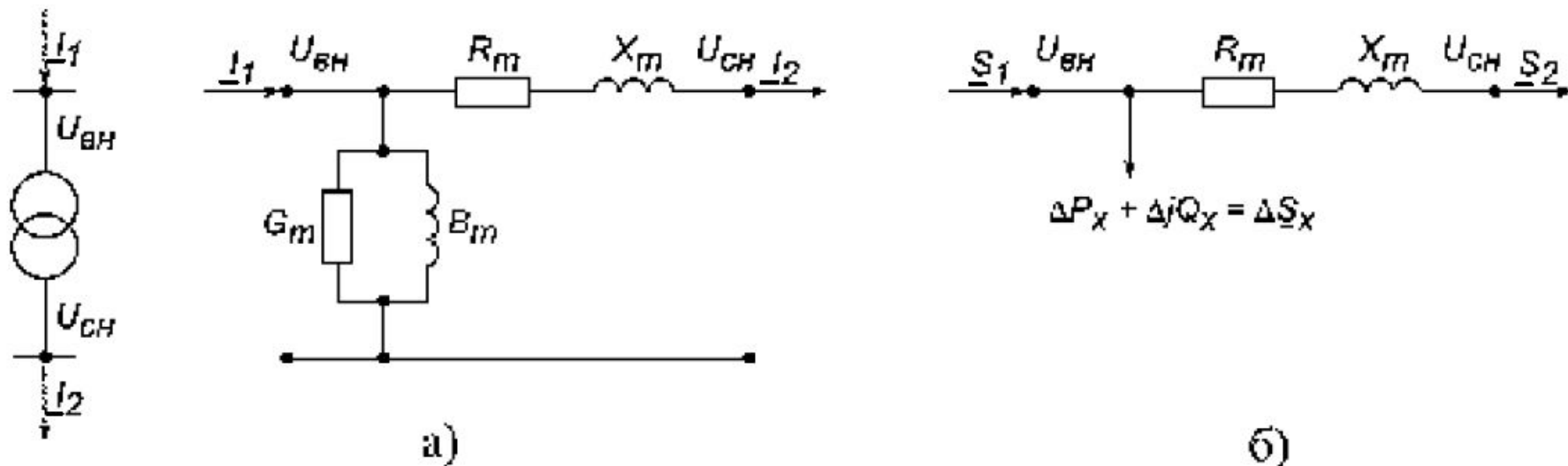
где  $K_{AT} = U_1 / U_2$ .

Очевидно, что  $S_m < S_{AT\text{ ном}}$ , поэтому выражение  $(1 - 1/K_{AT})$  называют коэффициентом выгоды,  $\alpha$ . Тогда  $S_m = \alpha \cdot S_{AT\text{ ном}}$ .



Типовая мощность - это та часть мощности автотрансформатора, которая передается электромагнитным путем. Как известно, размеры, масса, расход активных материалов определяются главным образом электромагнитной мощностью, поэтому по сравнению с трансформаторами той же мощности у автотрансформаторов меньшие размеры, меньший расход металла, ниже стоимость, меньшие потери мощности.

В паспортных данных напряжение короткого замыкания и потери мощности в режиме КЗ для автотрансформатора даются заводами - изготовителями: между обмотками ВН и СН -  $u_{K\ B-C}$ ,  $\Delta P_{K\ B-C}$  отнесенные к номинальной мощности, а между обмотками ВН и НН -  $u_{K\ B-H}$ ,  $\Delta P_{K\ B-H}$ , и СН-НН -  $u_{K\ C-H}$ ,  $\Delta P_{K\ C-H}$  - отнесенные к типовой мощности.



***Г-образная схема замещения трансформатора.***

поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности  $\Delta X$ .

При номинальном напряжении первичной обмотки  $U_{вн} \geq 330 \text{ кВ}$  используется схема, показанная на рис а), а при номинальном напряжении  $U_{вн} \leq 220 \text{ кВ}$  ветвь намагничивания в схеме замещения заменяется постоянным отбором мощности, равным суммарным потерям холостого хода

Активное сопротивление в схеме замещения равно сумме сопротивления первичной обмотки  $R_1$  и сопротивления вторичной обмотки  $R'_2$ , приведенного к первичной, т.е.

$$R_m = R_1 + R'_2 \quad (35)$$

и для одной фазы определяется по выражению:

$$R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{т ном}}^2}. \quad (36)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно сумме индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки  $X_1$  и приведенного к ней индуктивного сопротивления вторичной обмотки  $X'_2$ , т.е.

$$X_m = X_1 + X'_2. \quad (37)$$

Оно определяется по формуле:

$$X_m = \frac{u_{p, \%} \cdot U_{\text{вн}}^2}{100 \cdot S_{\text{т ном}}}, \quad (38)$$

где  $u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2}$  - индуктивная составляющая напряжения КЗ, равная падению напряжения на индуктивном сопротивлении трансформатора;

$u_a$  - активная составляющая напряжения КЗ, равная:

$$u_{a,\%} = \frac{\sqrt{3} I_{6H} R_m}{U_{6H}} \cdot 100\% = \frac{\Delta P_K}{S_{m\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (39)$$

где  $I_{6H}$  - номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

Для современных мощных трансформаторов  $R_m \ll X_m$  и  $u_p \approx u_k$ .

Следовательно:

$$X_m = \frac{u_{k,\%} \cdot U_{6H}^2}{100 \cdot S_{m\text{ном}}}. \quad (40)$$

Активная проводимость обусловлена потерями активной мощности в стали трансформатора на гистерезис и вихревые токи и определяется (для одной фазы) как

$$G_m = \frac{\Delta P_x}{U_{\text{фн}}^2}. \quad (41)$$

Индуктивная проводимость обусловлена основным магнитным потоком и учитывает потери реактивной мощности, расходуемые на намагничивание сердечника трансформатора. Она определяется по выражению:

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{\text{фн}}^2}, \quad (42)$$

где  $\Delta Q_x$  - потери реактивной мощности, определяемые реактивной составляющей вектора тока холостого хода, т.е.

$$I_{x,p} = \sqrt{I_x^2 - I_{x,a}^2}. \quad (43)$$

Но ввиду малости составляющей  $I_{x,a} \ll I_x$  принимают  $I_{x,p}$  равным модулю вектора тока холостого хода, т.е.

$$\Delta Q_x = \frac{I_{x,\%}}{100} \cdot S_{\text{мном}}. \quad (44)$$

При параллельной работе двух или более одинаковых трансформаторов ( $n_m \geq 2$ ) параметры схемы замещения определяются выражениями:

$$\underline{Z}_{m\Sigma} = \frac{R_m + jX_m}{n_m}, \quad (45)$$

$$\underline{Y}_{m\Sigma} = n_m (G_m + jB_m) \quad (46)$$

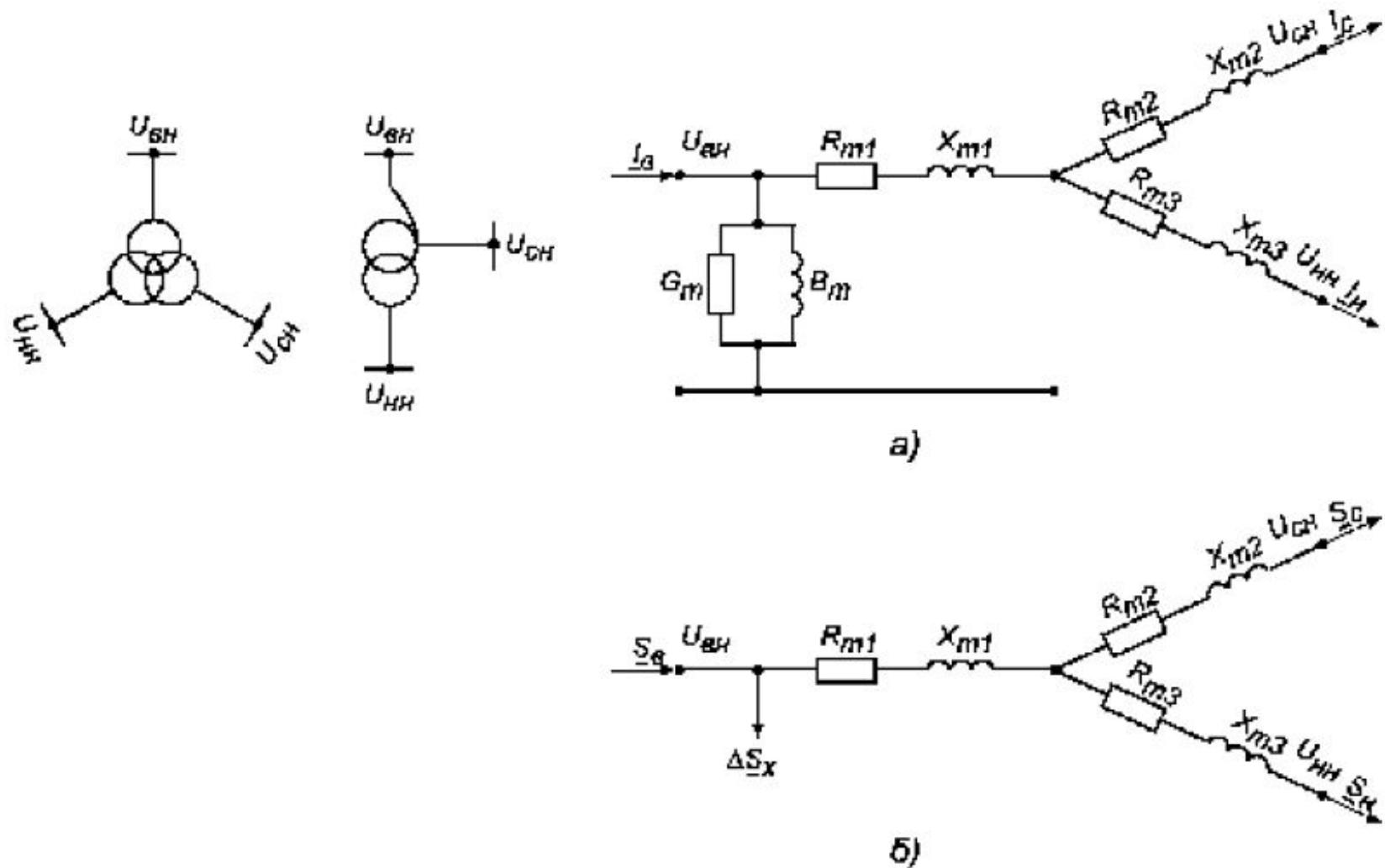
или

$$\Delta \underline{S}_x = n_m (\Delta P_x + j\Delta Q_x). \quad (47)$$

Согласно действующему стандарту соотношение между мощностями отдельных обмоток ВН / СН / НН в современных трехобмоточных трансформаторах одинаково, поэтому в паспортных данных приводятся общие потери короткого замыкания, по которым определяется общее активное сопротивление трансформатора:

$$R_m = \frac{\Delta P_k \cdot U_n^2}{S_{mном}^2}, \quad (48)$$

где  $U_n$  - номинальное напряжение той обмотки, к которой приводят сопротивление трансформатора. В основном это напряжение обмотки ВН.



*Схема замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.*



Тогда активное сопротивление каждой обмотки трансформатора при равенстве их мощностей составляет:

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = 0,5 R_{общ} . \quad (49)$$

Однако эксплуатируются и трехобмоточные трансформаторы с разными мощностями обмоток. В таком случае активные сопротивления лучей звезды в схеме замещения определяются по потерям мощности короткого замыкания, отнесенным к соответствующим лучам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\kappa 1} = \Delta P_{\kappa, \theta} &= 0,5 (\Delta P_{\kappa, \theta-c} + \Delta P_{\kappa, \theta-H} - \Delta P_{\kappa, c-H}) \\ \Delta P_{\kappa 2} = \Delta P_{\kappa, c} &= 0,5 (\Delta P_{\kappa, \theta-c} + \Delta P_{\kappa, c-H} - \Delta P_{\kappa, \theta-H}) \\ \Delta P_{\kappa 3} = \Delta P_{\kappa, H} &= 0,5 (\Delta P_{\kappa, \theta-H} + \Delta P_{\kappa, c-H} - \Delta P_{\kappa, \theta-c}) \end{aligned} \right\}, \quad (50)$$

$$R_{m1} = \frac{\Delta P_{\kappa 1} \cdot U_{\theta H}^2}{S_{\text{тн ом}}^2}, \quad (51)$$

$$R_{m2} = \frac{\Delta P_{\kappa 2} \cdot U_{\theta H}^2}{S_{\text{тн ом}}^2}, \quad (52)$$

$$R_{m3} = \frac{\Delta P_{\kappa 3} \cdot U_{\theta H}^2}{S_{\text{тн ом}}^2}. \quad (53)$$

Индуктивные сопротивления обмоток или лучей эквивалентной звезды схемы замещения находят по соответствующим значениям напряжения короткого замыкания обмоток, определяемым по каталожным данным:

$$\left. \begin{aligned} u_{k1} = u_{k, \delta} &= 0,5 (u_{k, \delta-c} + u_{k, \delta-n} - u_{k, c-n}) \\ u_{k2} = u_{k, c} &= 0,5 (u_{k, \delta-c} + u_{k, c-n} - u_{k, \delta-n}) \\ u_{k3} = u_{k, n} &= 0,5 (u_{k, \delta-n} + u_{k, c-n} - u_{k, \delta-c}) \end{aligned} \right\} \cdot \quad (54)$$

Учитывая, что в трехобмоточных трансформаторах  $u_{ka} \ll u_{kr}$  можно принять  $u_{kr} \approx u_k$ , получаем:

$$X_{m1} = \frac{u_{k1} \cdot U_{\delta n}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (55)$$

$$X_{m2} = \frac{u_{k2} \cdot U_{\delta n}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (56)$$

$$X_{m3} = \frac{u_{k3} \cdot U_{\delta n}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (57)$$

где  $u_{ki}$  задано в относительных единицах.

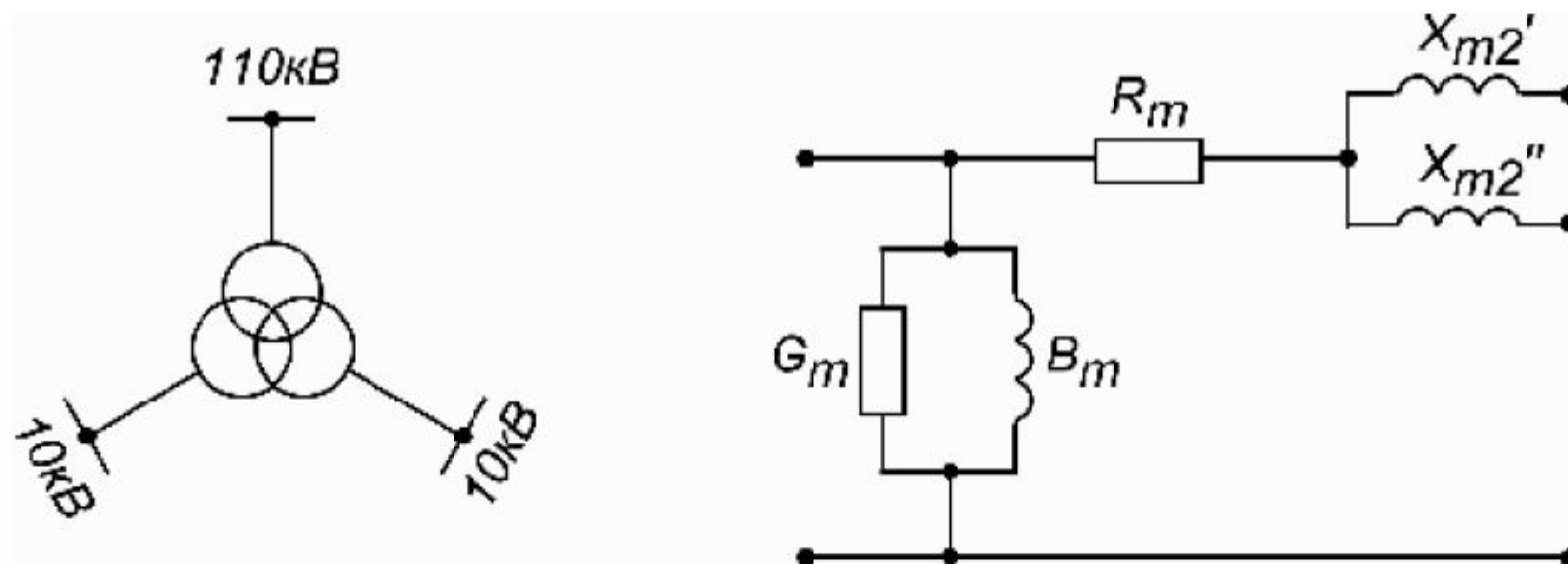
В отличие от трехобмоточных трансформаторов трансформаторы с расщепленной обмоткой низкого напряжения имеют соотношение мощностей обмоток 100/50/50 %, т.е. суммарная мощность обмоток низкого напряжения равна мощности обмотки высшего напряжения. Эти трансформаторы могут работать как с параллельным соединением обмоток, так и с отдельным их включением. В первом случае трансформатор с расщепленной обмоткой работает как обычный двухобмоточный трансформатор и параметры его схемы замещения определяются по выражениям, справедливым для двухобмоточных трансформаторов.

Индуктивные сопротивления обмоток определяются потоками рассеяния и зависят от взаимного расположения обмоток. Поскольку обмотка высокого напряжения располагается между обмотками низкого напряжения, ее индуктивное сопротивление можно считать равным нулю, а индуктивные сопротивления ветвей расщепленной обмотки  $X'_{2m}$  и  $X''_{2m}$  равны двойному значению общего сопротивления трансформатора:

$$X'_{2m} = X''_{2m} = 2X_m \text{ или } X_m = 0,5 X'_{2m} = 0,5 X''_{2m}. \quad (58)$$

Общее индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению для двухобмоточного трансформатора.

Исходя из сказанного, схему замещения трансформатора с расщепленной обмоткой можно представить в виде:



*Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой*

Общее активное сопротивление автотрансформатора определяется по потерям мощности  $\Delta P_{к, в-с}$  в режиме короткого замыкания в обмотках высокого и среднего напряжения, имеющих электрическую связь:

$$R_{общ} = \frac{\Delta P_{к12} \cdot U_{вн}^2}{S_{1ном}^2} = \frac{\Delta P_{к, в-с} \cdot U_{вн}^2}{S_{АТном}^2}. \quad (59)$$

Активные сопротивления обмоток ВН и СН будут равны, если мощности потерь  $\Delta P_{к}$  для них одинаковы. Тогда:

$$R_{m1} = R_{m2} = 0,5 R_{общ}. \quad (60)$$

Активное сопротивление обмотки низкого напряжения зависит от ее мощности и определяется из соотношения:

$$\frac{R_{m3}}{R_{m1}} = \frac{S_{AT ном}}{S_{НН}}. \quad (61)$$

Оно равно:

$$R_{m3} = \frac{R_{m1} \cdot S_{AT ном}}{S_{НН}}. \quad (62)$$

Если в каталоге приводятся потери мощности короткого замыкания между парами обмоток ( $\Delta P'_{к, в-н}$ ;  $\Delta P'_{к, с-н}$ ;  $\Delta P_{к, в-с}$ ), то  $\Delta P_{к, в-с}$  приведены к номинальной мощности автотрансформатора, а  $\Delta P'_{к, в-н}$  и  $\Delta P'_{к, с-н}$  — к типовой мощности (мощности обмотки НН).



При определении активных сопротивлений обмоток потери короткого замыкания должны быть приведены к номинальной мощности:

$$\Delta P_{кв-н} = \frac{\Delta P'_{кв-н}}{\alpha^2}; \quad (63)$$

$$\Delta P_{кс-н} = \frac{\Delta P'_{кс-н}}{\alpha^2}, \quad (64)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{S_{AT \text{ ном}}}{S_{\text{мин}}} = \frac{U_{вн} - U_{сн}}{U_{вн}}. \quad (65)$$

И уже по ним определяют потери мощности короткого замыкания для каждой из обмоток по выражению (50).

Тогда активные сопротивления обмоток равны:

$$R_{m1} = \frac{\Delta P_{\kappa 1} \cdot U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{АТ ном}}^2}, \quad (66)$$

$$R_{m2} = \frac{\Delta P_{\kappa 2} \cdot U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{АТ ном}}^2}, \quad (67)$$

$$R_{m3} = \frac{\Delta P_{\kappa 3} \cdot U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{АТ ном}}^2}. \quad (68)$$

Индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды определяются так же, как для трехобмоточного трансформатора, с использованием выражений (55)-(57). Если в каталоге или справочных данных указаны напряжения короткого замыкания пар обмоток ( $u'_{к, в-н}$ ,  $u'_{к, с-н}$ ), приведенные к типовой мощности, то их приведение к единому энергетическому уровню осуществляется по выражениям:

$$u_{к, в-н} = u'_{к, в-н} / \alpha, \quad (69)$$

$$u_{к, с-н} = u'_{к, с-н} / \alpha. \quad (70)$$

Проводимости автотрансформатора рассчитываются по выражениям (41) и (42), а потери мощности в стали - по выражению (47), где  $n_m=1$ .

Сопротивления и проводимости трансформаторов и автотрансформаторов могут быть отнесены не только к номинальному напряжению обмотки высокого напряжения  $U_{вн}$ , но и к напряжению других обмоток, если оно принимается за расчетное напряжение сети.