

## 1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются основным электрическим оборудованием, обеспечивающим передачу электрической энергии от электростанций к потребителям и ее распределение.

С помощью трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется повышение напряжения до значений 35; 110; 220; 330; 500; 750 кВ, необходимых для линий электропередачи, а также многократное ступенчатое понижение напряжения до значений, при которых работают электроприемники: 20; 10; 6; 0,66; 0,38; 0,22 кВ.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, однофазные и трехфазные, выпускаются номинальной мощностью, кратной 10, 16, 25, 40, 63 кВА. Трансформаторы могут быть двух- и трехобмоточные, а также с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

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,  $DP_K$ ;

напряжение короткого замыкания,  $u_K$ ;

потери активной мощности в режиме холостого хода,  $DP_x$ ;

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:

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

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  $DP_k$  идут на нагрев обмоток трансформатора, т.е.:

$$DP_k = 3I_{\text{ном}}^2 \times R_m = \frac{S_{\text{т ном}}^2}{U_{\text{вн}}^2 \times R_m}, \quad (29)$$

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,  $I_{\text{в ном}}$ :

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

Мощность потерь в режиме холостого хода складывается из мощности потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис,  $DP_x$ ; мощности, идущей на намагничивание стали,  $DQ_x$ ; мощности потерь в первичной обмотке, обусловленных током холостого хода. Но при холостом ходе  $I_x \ll I_{\text{в ном}}$ , - следовательно, мала мощность потерь в первичной обмотке по сравнению с потерями в магнитопроводе. Поэтому для трансформаторов с номинальной мощностью более 1 кВА учитываются только потери в стали:

$$\underline{DS}_x = DP_x + jDQ_x. \quad (31)$$

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:  $DP_{к, в-н}$ ;  $DP_{к, с-н}$ ;  $DP_{к, в-с}$ , %, 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,  $K_{АТ}$ . У большинства автотрансформаторов  $K_{АТ} \leq 2$ .

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. На рис. 5 показано распределение токов в одной фазе при работе автотрансформатора в понижающем режиме.

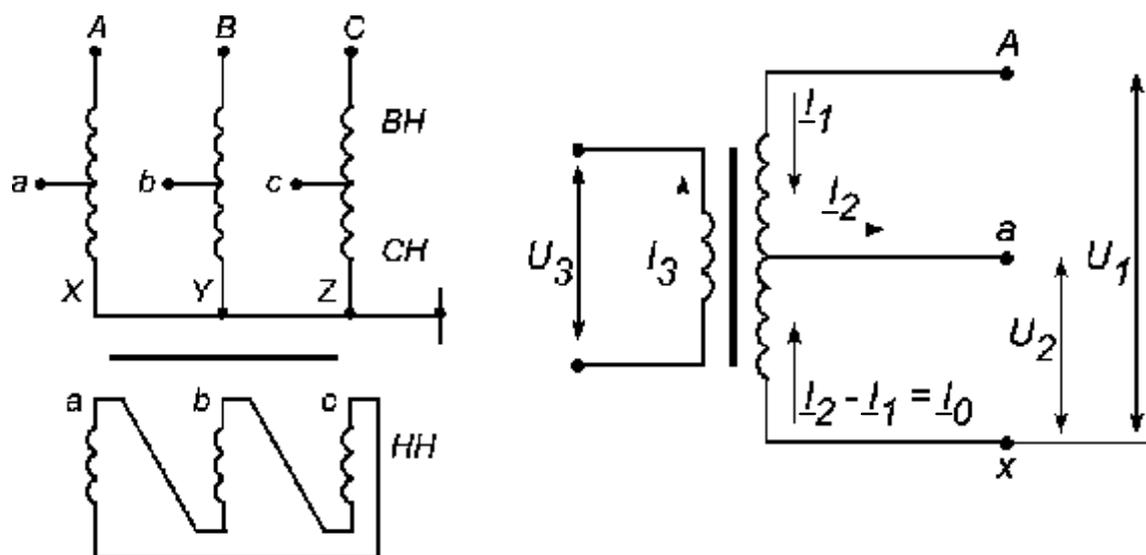


Рис. 5. Схема соединений обмоток автотрансформатора

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:

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

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

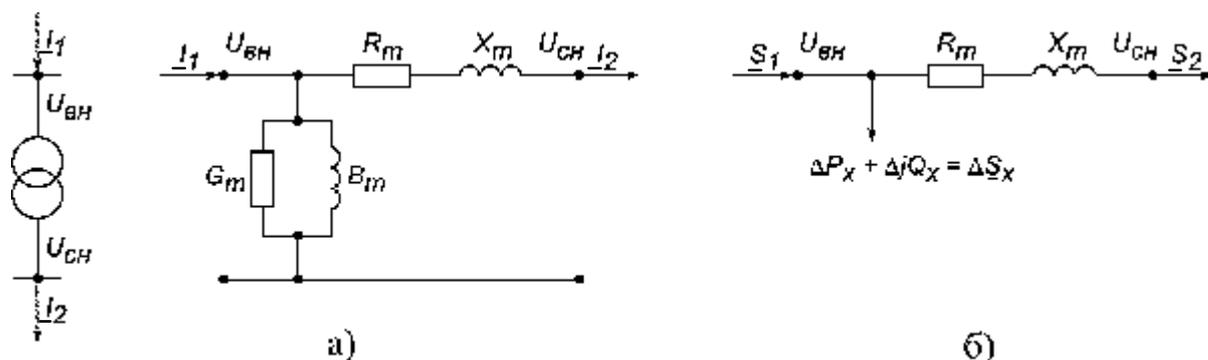
где  $K_{AT} = U_1 / U_2$ .

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

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 -  $u_{к в-с}$ ,  $DP_{к в-с}$  отнесенные к номинальной мощности, а между обмотками ВН и НН -  $u_{к в-н}$ ,  $DP_{к в-н}$ , и СН-НН -  $u_{к с-н}$ ,  $DP_{к с-н}$  - отнесенные к типовой мощности.

В схемах замещения электрических сетей двухобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы при ненагруженной обмотке низкого напряжения представляются в виде Г-образной схемы замещения, где ветвь намагничивания включена со стороны выводов обмотки высокого напряжения - в отличие от курса электрических машин, где схема замещения Т-образная. Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 6.



**Рис. 6. Г-образная схема замещения трансформатора.**

На рис. 6 поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности ХХ.

При номинальном напряжении первичной обмотки  $U_{вн} \approx 330 \text{ кВ}$  используется схема, показанная на рис. 6а, а при номинальном напряжении  $U_{вн} \approx 220 \text{ кВ}$  ветвь намагничивания в схеме замещения заменяется посто-

янным отбором мощности, равным суммарным потерям холостого хода (см. рис. 6б).

Активное сопротивление в схеме замещения равно сумме сопротивления первичной обмотки  $R_I$  и сопротивления вторичной обмотки  $R_{\zeta}$ , приведенного к первичной, т.е.

$$R_m = R_I + R_{\zeta} \quad (35)$$

и для одной фазы определяется по выражению:

$$R_m = \frac{DP_{\kappa} \times U_{\text{вн}}^2}{S_{\text{т ном}}^2}. \quad (36)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно сумме индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки  $X_I$  и приведенного к ней индуктивного сопротивления вторичной обмотки  $X_{\zeta}$ , т.е.

$$X_m = X_I + X_{\zeta}. \quad (37)$$

Оно определяется по формуле:

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

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

$u_a$  - активная составляющая напряжения КЗ, равная:

$$u_{a, \%} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{вн}} R_m}{U_{\text{вн}}} \times 100\% = \frac{DP_{\kappa}}{S_{\text{т ном}}} \times 100\%, \quad (39)$$

где  $I_{\text{вн}}$  - номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

Для современных мощных трансформаторов  $R_m \ll X_m$  и  $u_p \gg u_{\kappa}$ .

Следовательно: 
$$X_m = \frac{u_{\kappa, \%} \times U_{\text{вн}}^2}{100 \times S_{\text{т ном}}}. \quad (40)$$

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

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2}. \quad (41)$$

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

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{вн}^2}, \quad (42)$$

где  $DQ_x$  - 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.

$$DQ_x = \frac{I_{x,\%}}{100} \times S_{mном}. \quad (44)$$

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

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

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

или

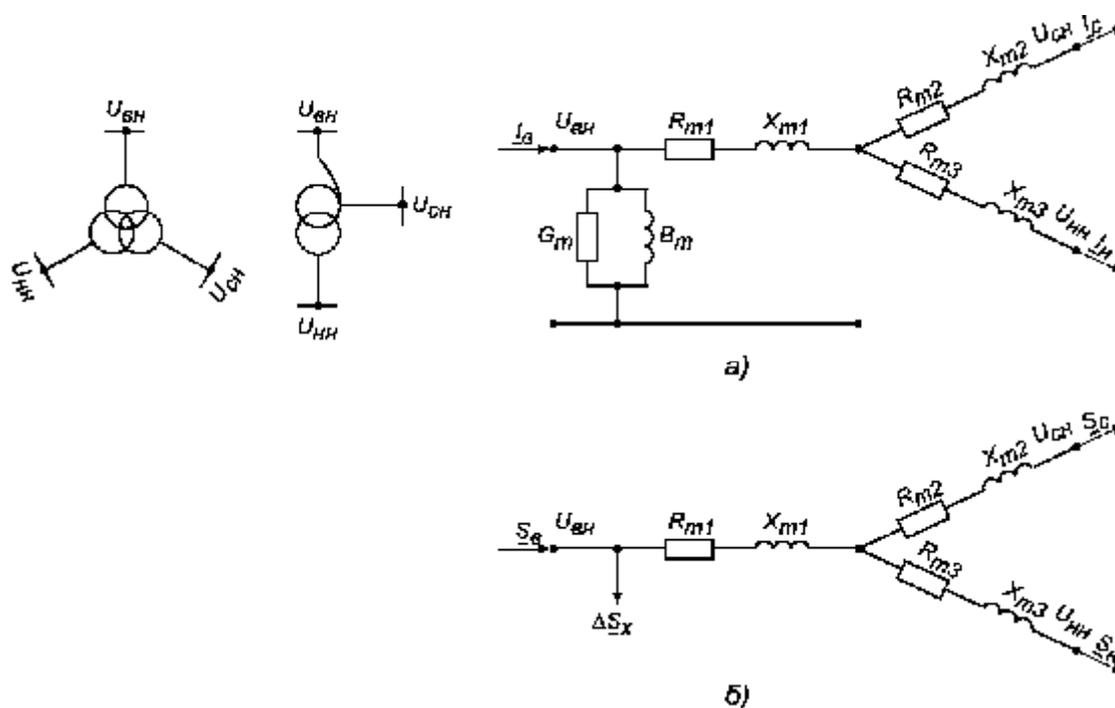
$$\underline{DS}_x = n_m (DP_x + jDQ_x). \quad (47)$$

Трехобмоточные трансформаторы в схемах замещения электрических сетей представляются трехлучевой звездой; в зависимости от номинального напряжения (как и для двухобмоточных трансформаторов) либо с ветвью намагничивания (рис. 7а), либо с заменой ее постоянным отбором мощности в режиме холостого хода (рис. 7б).

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:

$$R_m = \frac{DP_k \times U_n^2}{S_{\text{тиом}}^2}, \quad (48)$$

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



**Рис. 7. Схема замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.**

На рис. 7 поперечная ветвь проводимостей представлена:

- а) ветвью проводимостей;
- б) потерями мощности XX.

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

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

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:

$$\left. \begin{aligned} DP_{к1} = DP_{к, в} &= 0,5 (DP_{к, в-с} + DP_{к, в-н} - DP_{к, с-н}) \\ DP_{к2} = DP_{к, с} &= 0,5 (DP_{к, в-с} + DP_{к, с-н} - DP_{к, в-н}) \\ DP_{к3} = DP_{к, н} &= 0,5 (DP_{к, в-н} + DP_{к, с-н} - DP_{к, в-с}) \end{aligned} \right\}, \quad (50)$$

$$R_{m1} = \frac{DP_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}, \quad (51)$$

$$R_{m2} = \frac{DP_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}, \quad (52)$$

$$R_{m3} = \frac{DP_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}^2}. \quad (53)$$

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

$$\left. \begin{aligned} u_{к1} = u_{к, в} &= 0,5 (u_{к, в-с} + u_{к, в-н} - u_{к, с-н}) \\ u_{к2} = u_{к, с} &= 0,5 (u_{к, в-с} + u_{к, с-н} - u_{к, в-н}) \\ u_{к3} = u_{к, н} &= 0,5 (u_{к, в-н} + u_{к, с-н} - u_{к, в-с}) \end{aligned} \right\}. \quad (54)$$

Учитывая, что в трехобмоточных трансформаторах  $u_{ки} \ll u_{кр}$  можно принять  $u_{кр} \gg u_{к}$ , получаем:

$$X_{m1} = \frac{u_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (55)$$

$$X_{m2} = \frac{u_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (56)$$

$$X_{m3} = \frac{u_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}}, \quad (57)$$

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

Как правило, индуктивное сопротивление обмотки среднего напряжения  $X_{m2}$  благодаря взаимному влиянию соседних обмоток близко к нулю или имеет небольшое отрицательное значение, соответствующее емкостному сопротивлению, поэтому оно принимается равным нулю.

Активная и индуктивная проводимости трехобмоточного трансформатора рассчитываются, как и двухобмоточного, по выражениям (41), (42), а при их замене постоянным отбором мощности потери в стали  $D\underline{S}_x$  определяются по выражению (47), где  $n_m=1$ .

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.

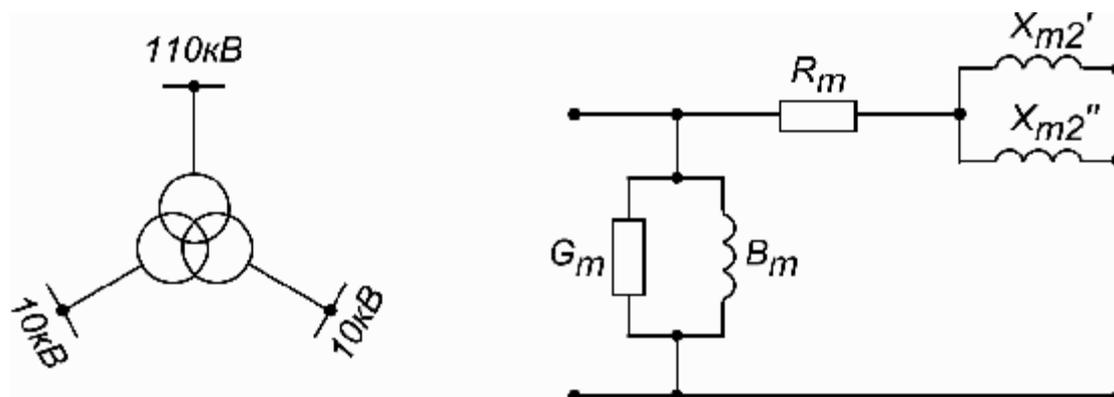
При отдельном включении расщепленных обмоток схема замещения трансформатора соответствует рис. 7, причем активные сопротивления лучей звезды, а также проводимости цепи намагничивания или потери в стали определяются по соответствующим выражениям для трехобмоточного трансформатора.

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  $X_{2m}^c$  и  $X_{2m}^{\alpha}$  равны двойному значению общего сопротивления трансформатора:

$$X_{2m}^c = X_{2m}^{\alpha} = 2X_m \text{ или } X_m = 0,5 X_{2m}^c = 0,5 X_{2m}^{\alpha}. \quad (58)$$

Общее индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению для двухобмоточного трансформатора.

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



**Рис. 8. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой**

Схема замещения автотрансформатора также представляется трехлучевой звездой (рис. 7). В отличие от трехобмоточного трансформатора автотрансформатор характеризуется номинальной и типовой мощностью, на которую рассчитана последовательная обмотка.

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

$$R_{общ} = \frac{DP_{к12} \times U_{вн}^2}{S_{1ном}^2} = \frac{DP_{к, в-с} \times U_{вн}^2}{S_{АТ ном}^2}. \quad (59)$$

Активные сопротивления обмоток ВН и СН будут равны, если мощности потерь  $DP_k$  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:

$$\frac{R_{m3}}{R_{m1}} = \frac{S_{ATном}}{S_{нн}}. \quad (61)$$

Оно равно:

$$R_{m3} = \frac{R_{m1} \times S_{ATном}}{S_{нн}}. \quad (62)$$

Если в каталоге приводятся потери мощности короткого замыкания между парами обмоток ( $DP_{кв-н}^c$ ;  $DP_{кс-н}^c$ ;  $DP_{кв-с}$ ), то  $DP_{кв-с}$  приведены к номинальной мощности автотрансформатора, а  $DP_{кв-н}^c$  и  $DP_{кс-н}^c$  – к типовой мощности (мощности обмотки НН).

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

$$DP_{кв-н} = \frac{DP_{кв-н}^c}{a^2}; \quad (63)$$

$$DP_{кс-н} = \frac{DP_{кс-н}^c}{a^2}, \quad (64)$$

где  $a = \frac{S_{ATном}}{S_{тип}} = \frac{U_{вн} - U_{сн}}{U_{вн}}$ . (65)

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

Тогда активные сопротивления обмоток равны:

$$R_{m1} = \frac{DP_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{ATном}^2}, \quad (66)$$

$$R_{m2} = \frac{DP_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{ATном}^2}, \quad (67)$$

$$R_{m3} = \frac{DP_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{ATном}^2}. \quad (68)$$

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 ( $u_{\zeta, в-н}$ ,  $u_{\zeta, с-н}$ ), приведенные к типовой мощности, то их приведение к единому энергетическому уровню осуществляется по выражениям:

$$u_{\kappa, в-н} = u_{\zeta, в-н} / a, \quad (69)$$

$$u_{\kappa, с-н} = u_{\zeta, с-н} / a. \quad (70)$$

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.

## Примеры решения задач

### Пример 1.3.

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТМН– 2500/110.

#### Решение.

По каталожным данным, например /5/, определяем характеристики трансформатора:  $U_{вн} = 110 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 10,5 \%$ ;  $DP_k = 22 \text{ кВт}$ ;  $DP_x = 5 \text{ кВт}$ ;  $I_x = 1,5 \%$ ;  $DQ_x = 37,5 \text{ квар}$ .

Трансформатор типа ТМН - трехфазный двухобмоточный, с номинальным напряжением обмотки высокого напряжения меньше 220 кВ, – следовательно, схема замещения такого трансформатора Г- образная с постоянным отбором мощности.

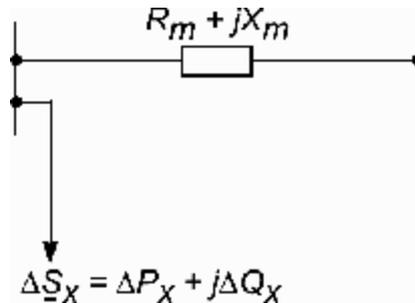


Рис. 9. Г-образная схема замещения трансформатора

Активное сопротивление трансформатора определяется по выражению (36):

$$R_m = \frac{DP_k \times U_{вн}^2}{S_{ном}^2} = \frac{22 \times 110^2 \times 10^3}{2500^2} = 42,6 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление находится по формуле (40):

$$X_m = \frac{u_{к,\%} \times U_{вн}^2}{100 \times S_{ном}} = \frac{10,5 \times 110^2 \times 10^6}{100 \times 2500 \times 10^3} = 508 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость определяется по данным опыта холостого хода согласно выражению (41):

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2} = \frac{5}{110^2 \times 10^3} = 4,13 \times 10^{-7} \text{ См},$$

а индуктивная проводимость - согласно выражению (42):

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{вн}^2} = \frac{37,5}{110^2 \times 10^3} = 3,1 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Индуктивная проводимость может быть определена и через ток холостого хода трансформатора:

$$B_m = \frac{I_{x,\%} \times S_{тном}}{100 U_{вн}^2} = \frac{1,5 \times 2500}{100 \times 110^2 \times 10^3} = 3,1 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Потери в стали или потери холостого хода равны:  $D\underline{S}_x = 5 + j37,5 \text{ кВА}$ .

#### **Пример 1.4.**

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора типа ТДЦТН-63000/220, отнесенные к высокому напряжению.

#### **Решение.**

Из каталожных данных, например /12/, записываем технические характеристики трансформатора:  $U_{вн} = 230 \text{ кВ}$ ;  $S_{тном} = 63000 \text{ кВА}$ ;  $u_{к, в-с} = 12,5 \%$ ;  $u_{к, в-н} = 24 \%$ ;  $u_{к, с-н} = 10,5 \%$ ;  $DP_k = 320 \text{ кВт}$ ;  $DP_x = 91 \text{ кВт}$ ;  $I_x = 1 \%$ . *Отношение между мощностями обмоток 100/100/100 %.*

Т.к. потери мощности КЗ заданы одной величиной для всего трансформатора, определим общее активное сопротивление трансформатора:

$$R_{общ} = \frac{DP_k \times U_{вн}^2}{S_{тном}^2} = \frac{320 \times 230^2 \times 10^3}{63000^2} = 4,26 \text{ Ом}.$$

Тогда активное сопротивление любой обмотки равно

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = 0,5 R_{общ} = 2,13 \text{ Ом}.$$

Напряжения короткого замыкания для лучей трехфазной схемы замещения равны

$$u_{к1} = 0,5(u_{к в-с} + u_{к в-н} - u_{к с-н}) = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(u_{кв-с} + u_{кс-н} - u_{кв-н}) = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(u_{кв-н} + u_{кс-н} - u_{кв-с}) = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%.$$

Определим индуктивные сопротивления лучей эквивалентной звезды:

$$X_{m1} = \frac{u_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{13 \times 230^2 \times 10}{63000} = 120,84 \text{ Ом},$$

$$X_{m2} = \frac{u_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{0 \times 230^2 \times 10}{63000} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{m3} = \frac{u_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{т ном}} = \frac{11 \times 230^2 \times 10}{63000} = 102,25 \text{ Ом}.$$

Из расчета видно, что в трансформаторах активное сопротивление мало по сравнению с индуктивным и им можно пренебречь.

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2} = \frac{91}{230^2 \times 10^3} = 1,55 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

Реактивная проводимость

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{вн}^2} = \frac{I_x \times S_{т ном}}{U_{вн}^2} = \frac{1,1 \times 63000}{100 \times 230^2 \times 10^3} = 1,85 \times 10^{-5} \text{ См}.$$

Схема замещения трансформатора представлена на рис. 7.

### **Пример 1.5.**

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТРДЦН-63000/330 с расщепленной обмоткой низкого напряжения, приведенные к стороне ВН (обмотка ВН расположена между обмотками НН). Обмотки НН включены параллельно.

### **Решение.**

Из /5/ определим каталожные данные трансформатора:

$$S_{ном} = 63000 \text{ кВА}; U_{1 ном} = 330 \text{ кВ}; U_{2 ном} = 10,5/10,5 \text{ кВ}; \Delta P_k = 265 \text{ кВт};$$

$$u_k = 11\%; \Delta P_x = 120 \text{ кВт}; I_x = 0,7\%.$$

Схема замещения этого трансформатора соответствует рис. 8.

Определим активное сопротивление обмоток

$$R_m = \frac{DP_k \times U_{I \text{ ном}}^2}{S_m^2 \text{ ном}} = \frac{265 \times 10^3 \times 330^2}{63000^2} = 7,35 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора находим по  $u_k$ , т.к. это трансформатор большой мощности

$$X_m = \frac{u_{k,\%} \times U_{I \text{ ном}}^2}{100 \times S_m \text{ ном}} = \frac{11 \times 330^2 \times 10^3}{100 \times 63000} = 190 \text{ Ом.}$$

Для трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$X_2' = X_2'' = 2 \times X_m = 380 \text{ Ом.}$$

Активная проводимость трансформатора

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{I \text{ ном}}^2} = \frac{120}{330^2 \times 10^3} = 1,1 \times 10^{-6} \text{ См.}$$

Индуктивная проводимость трансформатора

$$B_m = \frac{DQ_x}{U_{I \text{ ном}}^2} = \frac{I_{x,\%} \times S_m \text{ ном}}{100 \times U_{I \text{ ном}}^2} = \frac{0,7 \times 63000}{100 \times 330^2 \times 10^3} = 4,07 \times 10^{-6} \text{ См.}$$

Полные потери мощности в стали трансформатора

$$DS_x = DP_x + jDQ_x = DP_x + j \frac{I_{x,\%} \times S_m \text{ ном}}{100} = 120 + j441 \text{ кВА.}$$

### Пример 1.6.

Определить параметры схемы замещения трехфазного трехобмоточного автотрансформатора типа АТДЦТН-200000/220/110. Составить схему замещения и определить ее параметры при условии установки на подстанции двух автотрансформаторов.

### Решение.

Каталожные данные автотрансформатора:  $S_m \text{ ном} = 200000 \text{ кВА}$ ;  
 $U_{1 \text{ ном}} = 230 \text{ кВ}$ ;  $U_{2 \text{ ном}} = 121 \text{ кВ}$ ;  $U_{3 \text{ ном}} = 11 \text{ кВ}$ ;  $u_{k, \text{ в-с}} = 11 \%$ ;  $u_{k, \text{ в-н}} = 32 \%$ ;  $u_{k, \text{ с-н}} = 20 \%$ ;

$\Delta P_{к, в-с} = 430 \text{ кВт}; \Delta P_{к, в-н} = 360 \text{ кВт}; \Delta P_{к, с-н} = 320 \text{ кВт}; \Delta P_x = 125 \text{ кВт};$   
 $I_x = 0,5 \%$ . Соотношение мощностей обмоток 100/100/50 % /14/.

Приведем каталожные данные, отнесенные к мощности обмотки низкого напряжения  $\Delta P_{к, в-н}$ ,  $\Delta P_{к, с-н}$ , к номинальной мощности автотрансформатора:

$$DP_{к, в-н} = \frac{DP'_{к, в-н}}{a^2} = \frac{360}{0,5^2} = 1440 \text{ кВт},$$

$$DP_{к, с-н} = \frac{DP'_{к, с-н}}{a^2} = \frac{320}{0,5^2} = 1280 \text{ кВт},$$

$$\text{где } a = \frac{S_{\text{тип}, \%}}{S_{\text{ат ном}, \%}} = \frac{50}{100} = 0,5.$$

Определим по выражениям (54) и (50) напряжения и потери активной мощности короткого замыкания, соответствующие лучам схемы замещения данного автотрансформатора

$$u_{к1} = 0,5(11 + 32 - 20) = 11,5\%,$$

$$u_{к2} = 0,5(11 + 20 - 32) = 0\%,$$

$$u_{к3} = 0,5(32 + 20 - 11) = 20,5\%,$$

$$DP_{к1} = 0,5(430 + 1440 - 1280) = 295 \text{ кВт},$$

$$DP_{к2} = 0,5(430 + 1280 - 1440) = 135 \text{ кВт},$$

$$DP_{к3} = 0,5(1440 + 1280 - 430) = 1145 \text{ кВт}.$$

По значениям  $u_k$  и  $\Delta P_k$  определим активные и индуктивные сопротивления автотрансформатора по выражениям (51-53) и (55-57).

$$R_{AT1} = \frac{DP_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}^2} = \frac{295 \times 230^2 \times 10^3}{200000^2} = 0,39 \text{ Ом},$$

$$R_{AT2} = \frac{DP_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}^2} = \frac{135 \times 230^2 \times 10^3}{200000^2} = 0,179 \text{ Ом},$$

$$R_{AT3} = \frac{DP_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}^2} = \frac{1145 \times 230^2 \times 10^3}{200000^2} = 1,51 \text{ Ом},$$

$$X_{AT1} = \frac{u_{к1} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = \frac{11,5 \times 230^2 \times 10}{200000} = 30,41 \text{ Ом},$$

$$X_{AT2} = \frac{u_{к2} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = 0 \text{ Ом},$$

$$X_{AT3} = \frac{u_{к3} \times U_{вн}^2}{S_{AT ном}} = \frac{20,5 \times 230^2 \times 10}{200000} = 54,2 \text{ Ом}.$$

Потери реактивной мощности одного автотрансформатора составляют

$$DQ_x = \frac{I_{x,\%} \times S_{AT ном}}{100\%} = \frac{0,5 \times 200000}{100} = 1000 \text{ квар}.$$

Суммарные потери холостого хода равны

$$D\underline{S}_x = DP_x + jDQ_x = 125 + j1000 \text{ кВА}.$$

Активная и индуктивная проводимости определяются по выражениям (41-42):

$$G_{AT} = \frac{DP_x}{U_{I ном}^2} = \frac{125}{230^2 \times 10^3} = 2,36 \times 10^{-6} \text{ См},$$

$$B_{AT} = \frac{DQ_x}{U_{I ном}^2} = \frac{1000}{230^2 \times 10^3} = 18,9 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

При условии установки на подстанции двух автотрансформаторов схема включения и схема замещения приведены на рис. 10.

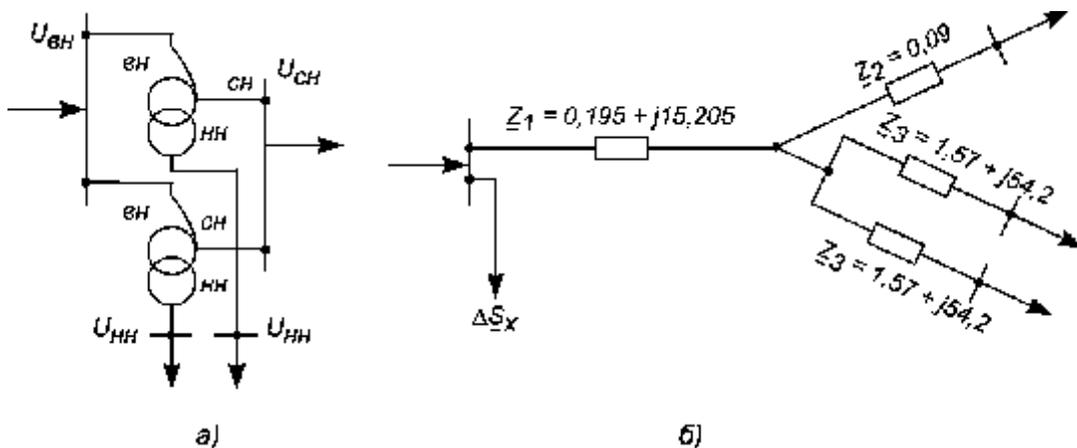


Рис. 10. Схемы автотрансформаторов:

а) схема включения двух трансформаторов,

б) схема замещения.

Учитывая параллельное включение обмоток ВН и СН, определим их эквивалентные сопротивления

$$Z_1 = \frac{Z_{AT1}}{2} = \frac{(0,39 + j30,41)}{2} = 0,195 + j15,205 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = \frac{Z_{AT2}}{2} = \frac{0,179 + j0}{2} = 0,09 \text{ Ом}.$$

Т.к. обмотки НН автотрансформаторов работают каждая на свою нагрузку, то  $Z_3 = Z_{AT3} = 1,51 + j54,2 \text{ Ом}$ .

Суммарные потери холостого хода обоих автотрансформаторов равны

$$\underline{DS}_x = 2(DP_x + jDQ_x) = 2(125 + j1000) = 250 + j2000 \text{ кВА}.$$

### **Пример 1.7.**

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТДЦ-80000/220, приведенные к уровню высокого и низкого напряжения.

### **Решение.**

Трансформатор типа ТДЦ-80000/220 двухобмоточный. Его характеристики определяются из /5/ и равны:  $U_{вн} = 242 \text{ кВ}$ ;  $U_{нн} = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 11\%$ ;  $\Delta P_k = 320 \text{ кВт}$ ;  $\Delta P_x = 105 \text{ кВт}$ ;  $I_x = 0,6 \%$ .

Активное сопротивление обмоток:

$$\text{приведенное к высокой стороне } R_m = \frac{\Delta P_k \times U_{вн}^2}{S_{m \text{ ном}}^2} = \frac{320 \times 242^2 \times 10^3}{80000^2} = 2,93 \text{ Ом},$$

$$\text{приведенное к низкой стороне } R_m' = \frac{\Delta P_k \times U_{нн}^2}{S_{m \text{ ном}}^2} = \frac{320 \times 10,5^2 \times 10^3}{80000^2} = 0,0055 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмоток:

$$\text{приведенное к высокой стороне } X_m = \frac{u_k \times U_{вн}^2}{S_{m \text{ ном}}} = \frac{11 \times 242^2 \times 10}{80000} = 80,5 \text{ Ом},$$

приведенное к низкой стороне  $X'_m = \frac{u_k \times U_{нн}^2}{S_{m \text{ ном}}} = \frac{11 \times 10,5^2 \times 10}{80000} = 0,15 \text{ Ом.}$

Поперечные проводимости, приведенные к высокой стороне

$$G_m = \frac{DP_x}{U_{вн}^2} = \frac{105}{242^2 \times 10^3} = 1,79 \times 10^{-5} \text{ См,}$$

$$B_m = \frac{I_{x,\%} \times S_{m \text{ ном}}}{U_{вн}^2} = \frac{0,6 \times 80000}{242^2 \times 10^3} = 8,19 \times 10^{-5} \text{ См,}$$

приведенные к низкой стороне

$$G'_m = \frac{DP_x}{U_{нн}^2} = \frac{105}{10,5^2 \times 10^3} = 9,5 \times 10^{-4} \text{ См,}$$

$$B'_m = \frac{I_{x,\%} \times S_{m \text{ ном}}}{U_{нн}^2} = \frac{0,6 \times 80000}{10,5^2 \times 10^5} = 4,35 \times 10^{-3} \text{ См.}$$

### Пример 1.8.

Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 417000/750/500 при номинальных параметрах одной фазы:  $S_{ном \text{ ф}} = 417 \text{ МВА}$ ;  $U_{вн} = 750 / \sqrt{3} \text{ кВ}$ ;  $U_{сн} = 500 / \sqrt{3} \text{ кВ}$ ;  $U_{нн} = 10,65 \text{ кВ}$ . Номинальные мощности обмоток относятся как 100/100/25 %. Напряжения КЗ равны:  $u_{к, в-с} = 9,65 \%$ ;  $u_{к, в-н} = 63 \%$ ;  $u_{к, с-н} = 51 \%$ .  $\Delta P_{к, в-с} = 920 \text{ кВт}$ ;  $\Delta P_x = 330 \text{ кВт}$ ;  $I_x = 0,5 \%$ .

### Решение.

Т.к. рассматривается группа из однофазных автотрансформаторов, активные и индуктивные сопротивления обмоток ВН, СН и НН определим при рассмотрении только одной фазной группы; аналогично поступим и с поперечными проводимостями. В этом случае в выражениях для сопротивлений и проводимостей автотрансформаторов используется фазные, а не линейные напряжения.

Определим напряжения короткого замыкания каждой обмотки по выражениям (54):

$$u_{k1} = 0,5(u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кс-н}) = 0,5(9,65 + 63 - 51) = 10,83\%,$$

$$u_{k2} = 0,5(u_{кв-с} + u_{кс-н} - u_{кв-н}) = 0,5(9,65 + 51 - 63) = 0\%,$$

$$u_{k3} = 0,5(u_{кв-н} + u_{кс-н} - u_{кв-с}) = 0,5(63 + 51 - 9,65) = 52,175\%.$$

Индуктивные сопротивления обмоток равны:

$$X_1 = \frac{u_{k1} \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{S_{\text{ф ном}}} = \frac{10,83 \frac{750}{\sqrt{3}}}{417000} 10 = 48,7 \text{ Ом},$$

$$X_2=0; \quad X_3 = \frac{u_{k3} \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{S_{\text{ф ном}}} = \frac{52,175 \frac{750}{\sqrt{3}}}{417000} 10 = 234,61 \text{ Ом}.$$

Общее активное сопротивление трехфазной группы однофазных автотрансформаторов равно:

$$R_{\text{общ}} = \frac{DP_{к,в-с} \frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}}{S_{\text{ф ном}}^2} = \frac{920 \frac{750}{\sqrt{3}}}{417^2} 10^{-3} = 0,99 \text{ Ом}.$$

Поскольку номинальные мощности обмоток ВН и СН одинаковы, то

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{\text{общ}}}{2} = 0,495 \text{ Ом}.$$

Номинальная мощность обмотки НН составляет 25% от номинальной мощности обмотки ВН, поэтому из выражения (62) следует:  $R_3 = 4R_1 = 0,99 \cdot 4 = 3,96 \text{ Ом}$ .

Поперечная проводимость для одной фазы равна:

$$\text{активная} \quad - G = \frac{DP_x}{\frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \times 10^3} = \frac{330}{\frac{750}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 1,76 \times 10^{-6} \text{ См},$$

$$\text{реактивная} \quad - B = \frac{I_x \times S_{\text{ф ном}}}{\frac{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \times 10^5} = \frac{0,5 \times 412000}{\frac{750}{\sqrt{3}} \times 10^5} = 11 \times 10^{-6} \text{ См}.$$

## Задачи для самостоятельного решения

### №1

Трансформатор типа ТМ – 6300 /110 имеет потери реактивной мощности в режиме холостого хода (х.х.)  $\Delta Q_x = 63$  квар. Чему равна реактивная составляющая тока холостого хода? Определить параметры схемы замещения трансформатора.

### №2

При испытаниях трансформатора типа ТМ – 2500 /110 оказалось, что потери реактивной мощности в опыте холостого хода составили 37,5 квар, а ток холостого хода - 1,5 %. Определить параметры схемы замещения трансформатора, а также активную составляющую тока холостого хода. Сравнить со справочными данными.

### №3

Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора типа ТМН - 1600/35. Определить, сколько процентов реактивной составляющей напряжения короткого замыкания приходится на долю активной составляющей.

### №4

Определить, во сколько раз активная составляющая напряжения короткого замыкания меньше реактивной у трансформатора ТМ-4000/10. Определить параметры схемы замещения двух отдельно работающих трансформаторов.

#### №5

Во сколько раз реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора типа ТД - 10000 /110 больше активной, если ток холостого хода  $I_x = 1 \%$ , а  $\Delta Q_x = 100$  квар. Определить параметры схемы замещения трансформатора.

#### №6

Определить параметры схемы замещения трансформатора типа ТД-10000/35 и долю активной составляющей тока холостого хода в процентах от его величины по данным опыта холостого хода:  $I_x = 0,8\%$ ;  $\Delta Q_x = 80$  квар,  $\Delta P_x = 14,5$  кВт.

#### №7

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДНС-16000/35 и ТРДНС-25000/35 и рассчитать их параметры. В чем отличие схем замещения?

#### №8

Построить схемы замещения трансформаторов типа ТДН-25000/110 и ТРДН 25000/110 и рассчитать их параметры. Обмотки низкого напряжения трансформатора типа ТРДН - 25000 /110 включены отдельно.

#### №9

Построить схему замещения и определить ее параметры для силового трансформатора типа ТРДЦНК - 80000 /110 при параллельной работе обмоток низкого напряжения (НН). Как изменятся параметры схемы замещения трансформатора при отдельной работе обмоток НН ?

#### №10

На подстанции установлены два трансформатора типа ТМТН-6300/110, работающие на общую нагрузку. Построить эквивалентную схему замещения подстанции и рассчитать ее параметры.

#### №11

Для связи потребителя с источником на подстанции установлен трансформатор типа ТДТН – 10000 / 110, у которого  $U_{\text{ВН}} = 115$  кВ;  $U_{\text{СН}} = 38,5$  кВ;  $U_{\text{НН}} = 11$  кВ. Определить параметры его схемы замещения, приведенные к стороне высокого напряжения, а затем - к стороне низкого напряжения.

#### №12

Привести схему замещения и рассчитать ее параметры для двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДЦТН - 80000/110/35/10.

#### №13

Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора типа ТДТН – 40000/220/35/6 кВ, приведенные к высокой стороне и к средней стороне трансформатора.

#### №14

Рассчитать параметры схемы замещения двух параллельно работающих автотрансформаторов АТДЦТН - 250000 /220 /110.

#### №15

Начертить схему замещения и определить ее параметры для силового трансформатора типа ТДТН - 25000 /220 при соотношении мощностей его обмоток 100 /100 /67 %. Как изменятся параметры схемы замещения, если соотношение мощностей обмоток трансформатора составит 100 /100 /100 %?

#### №16

Привести схему замещения для двух параллельно работающих автотрансформаторов типа АДЦТН - 250000 /330 /150 и определить ее параметры.

#### №17

Определить параметры схемы замещения двух параллельно работающих трансформаторов типа ТДЦ - 125000 /220 и показать их значения на схеме замещения.

#### №18

Составить схему замещения и определить ее параметры для автотрансформатора АДЦТН - 200000 /220 /110, принимая за базисное высшее напряжение автотрансформатора.

#### №19

Как изменятся параметры схемы замещения, если в качестве базисного значения сначала принять высшее напряжение трансформатора, а затем – низшее? Показать на примере трансформатора ТРДНС – 63000/220.

#### №20

Рассчитать параметры схемы замещения трехфазной группы из однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН - 167000 /500 /220.

***Примечание: во всех задачах расшифровать тип трансформаторов и автотрансформаторов.***