

ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Схемы замещения трёхобмоточных трансформаторов.
2. Параметры схемы замещения автотрансформаторов.

Схемы замещения трёхобмоточных трансформаторов.

В последние годы отечественные трёхобмоточные трансформаторы изготавливают с обмотками ВН, СН и НН одинаковой мощности (100 %). Ранее выпускались такие трёхобмоточные трансформаторы, у которых обмотки НН и СН могли иметь мощность в 1,5 раза меньше, чем мощность обмотки ВН ($100/1,5 = 66,7\%$).



Рис. 1. Схемы подстанций с тремя номинальными напряжениями:

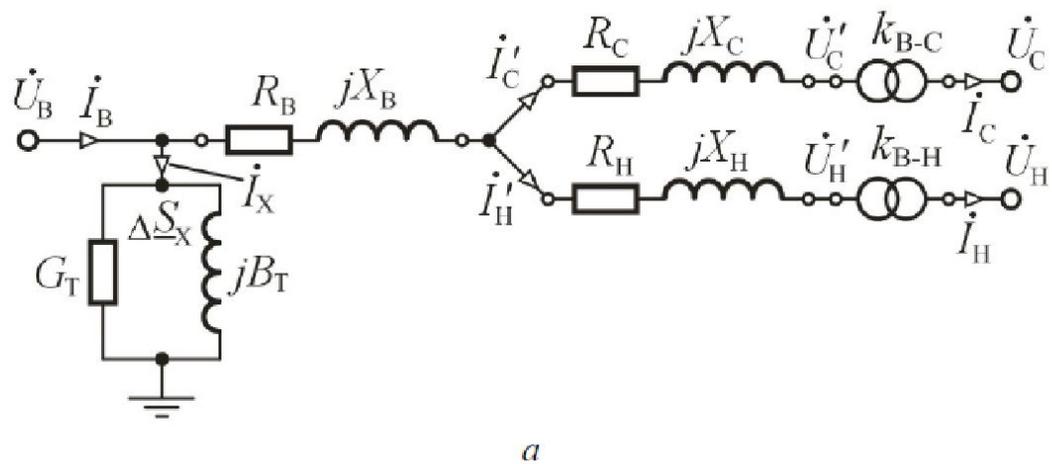
а – трёхобмоточный трансформатор; б – два двухобмоточных трансформатора

Схема замещения трёхобмоточного трансформатора одной фазы представляет трёхлучевую звезду (рис. 2). Параметры этой схемы – активные $R_{в}, R_{с}, R_{н}$ и индуктивные $X_{в}, X_{с}, X_{н}$ сопротивления обмоток ВН, СН, НН – приведены к напряжению первичной обмотки трансформатора. Ветвь намагничивания включена на первичных зажимах схемы замещения трансформатора.

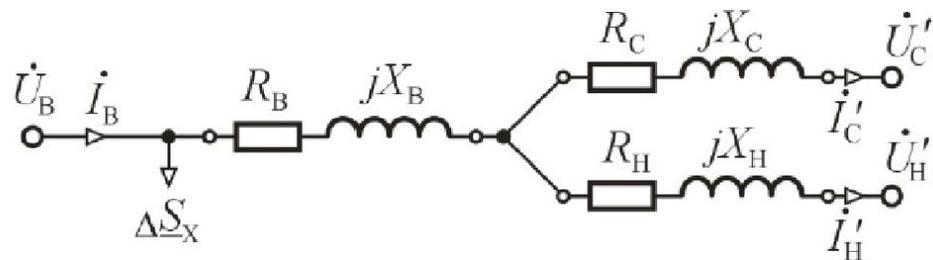
Её параметры определяют так же, как и для двухобмоточных трансформаторов по формулам:

$$G_{\tau} = \frac{\Delta P_{\text{х}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3}.$$

$$B_{\tau} = \frac{\Delta Q_{\text{х}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{I_{\text{х}}}{100\%} \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3},$$



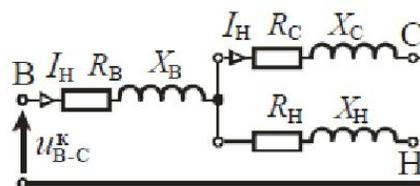
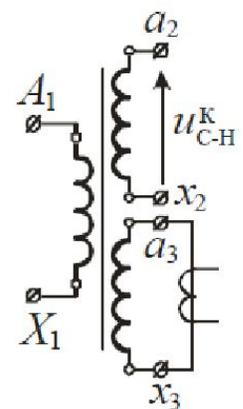
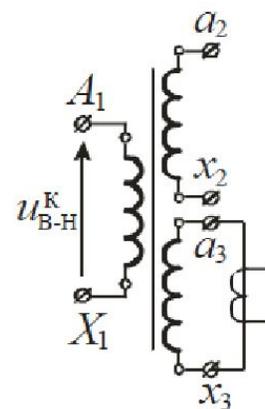
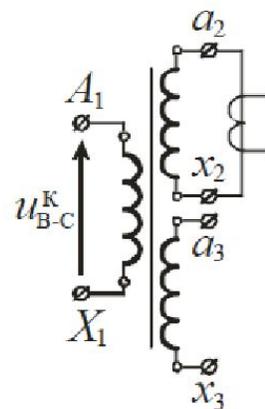
a



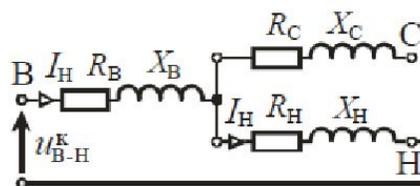
б

В этом опыте одна из обмоток подключена к источнику питания, вторая замкнута накоротко, третья разомкнута (рис. 3). Это позволяет при расчёте сопротивлений рассматривать схему замещения трёхобмоточного трансформатора как два последовательно соединённых луча.

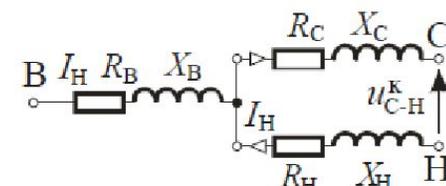
Рис. 3. Схемы трёх опытов короткого замыкания трёхобмоточного трансформатора при участии обмоток: *a* – ВН – СН; *б* – ВН – НН; *в* – СН – НН



a



б



в

Рис. 2. Схемы замещения трёхобмоточного трансформатора: *a* – с учётом трансформации; *б* – без учёта трансформации

В соответствии с этой схемой замещения для трёхобмоточного трансформатора в отличие от двухобмоточного нужно определить сопротивление каждой обмотки в отдельности по данным опытов короткого замыкания.

Результаты опытов короткого замыкания позволяют сформировать системы линейных уравнений следующего вида:

$$\Delta P_{\text{KB}} + \Delta P_{\text{КС}} = \Delta P_{\text{К В-С}},$$

$$\Delta P_{\text{КС}} + \Delta P_{\text{КН}} = \Delta P_{\text{К С-Н}},$$

$$\Delta P_{\text{КС}} + \Delta P_{\text{КН}} = \Delta P_{\text{К С-Н}};$$

$$u_{\text{KB}} + u_{\text{КС}} = u_{\text{К В-С}},$$

$$u_{\text{KB}} + u_{\text{КН}} = u_{\text{К В-Н}},$$

$$u_{\text{КС}} + u_{\text{КН}} = u_{\text{К С-Н}}.$$

Решая уравнения относительно ΔP_{KB} , $\Delta P_{\text{КС}}$, $\Delta P_{\text{КН}}$, получаем

$$\Delta P_{\text{KB}} = \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{К В-С}} + \Delta P_{\text{К В-Н}} - \Delta P_{\text{К С-Н}}),$$

$$\Delta P_{\text{КС}} = \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{В-С}} + \Delta P_{\text{КС-Н}} - \Delta P_{\text{К В-Н}}),$$

$$\Delta P_{\text{КН}} = \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{К В-Н}} + \Delta P_{\text{К С-Н}} - \Delta P_{\text{К В-С}}).$$

Аналогично из систем уравнений

$$u_{\text{KB}} = \frac{1}{2} (u_{\text{К В-С}} + u_{\text{К В-Н}} - u_{\text{К С-Н}}),$$

$$u_{\text{КС}} = \frac{1}{2} (u_{\text{К В-С}} + u_{\text{К С-Н}} - u_{\text{К В-Н}}),$$

$$u_{\text{КН}} = \frac{1}{2} (u_{\text{К В-Н}} + u_{\text{К С-Н}} - u_{\text{К В-С}}).$$

В общем случае активные и реактивные сопротивления обмоток трёх-обмоточных трансформаторов определяют по тем же формулам, что и для двухобмоточных трансформаторов.

$$R_{\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{К}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3}.$$

$$X_{\text{T}} \approx Z_{\text{T}} = \frac{u_{\text{К}}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}.$$

Реактивное сопротивление X_c или X_n , соответствующее обмотке, расположенной между двумя другими обмотками, благодаря их взаимному влиянию обычно имеет величину, близкую к нулю, либо небольшое отрицательное значение и в практических расчётах принимается равным нулю.

Для трансформаторов с одинаковыми мощностями обмоток суммарные потери короткого замыкания на пару обмоток поровну распределяются между соответствующими обмотками, т. е. в этом случае активные сопротивления лучей схемы замещения вычисляют по формуле

$$R_B = R_C = R_H = \frac{1}{2} \Delta P_K U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2.$$

Если в трёхобмоточном трансформаторе одна из обмоток имеет мощность меньше номинальной (соотношение $S_{ВН}/S_{СН}/S_{НН} = 100/100/66,7 \%$ или $100/66,7/100 \%$), то активные сопротивления лучей схемы замещения для обмоток с номинальной мощностью 100 % определяются аналогично предыдущему случаю:

$$R_{100} = \frac{1}{2} \Delta P_K U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2.$$

Величину активного сопротивления луча схемы замещения соответствующей обмотки с меньшей мощностью (66,7 %), приведённую к номинальной мощности трансформатора, находят, учитывая обратную пропорциональность сопротивлений и мощностей обмоток:

$$\frac{R_{66,7}}{R_{100}} = \frac{100}{66,7}, \quad R_{66,7} = 1,50 \cdot R_{100}.$$

Расчёт режимов электрических сетей, приведённых к одному номинальному напряжению, выполняют с учётом схемы замещения, представленной на рис. 2, б.

Параметры схемы замещения автотрансформаторов.

Автотрансформатор представляет собой многообмоточный трансформатор, у которого две обмотки связаны магнитно и электрически (контактно). Наиболее экономически целесообразно применять автотрансформаторы для связи сетей с глухозаземленными нейтралями напряжением 110 кВ и выше с соотношением номинальных напряжений до 3–4, например, 220 и 110 кВ, 500 и 220 кВ и др. В энергосистемах нашли применение трехобмоточные автотрансформаторы – трехфазные и однофазные, собираемые в трехфазные группы.

На рис. 4 изображена схема соединений обмоток трёхобмоточного автотрансформатора. Обмотка высшего напряжения (ВН) 1 состоит из двух обмоток – общей и последовательной. Обмотка среднего напряжения (СН) 2 является частью обмотки ВН и называется общей обмоткой, а остальная часть обмотки ВН – последовательной обмоткой. Третья обмотка 3 представляет собой обмотку низшего напряжения (НН) и связана с другими обмотками только магнитно

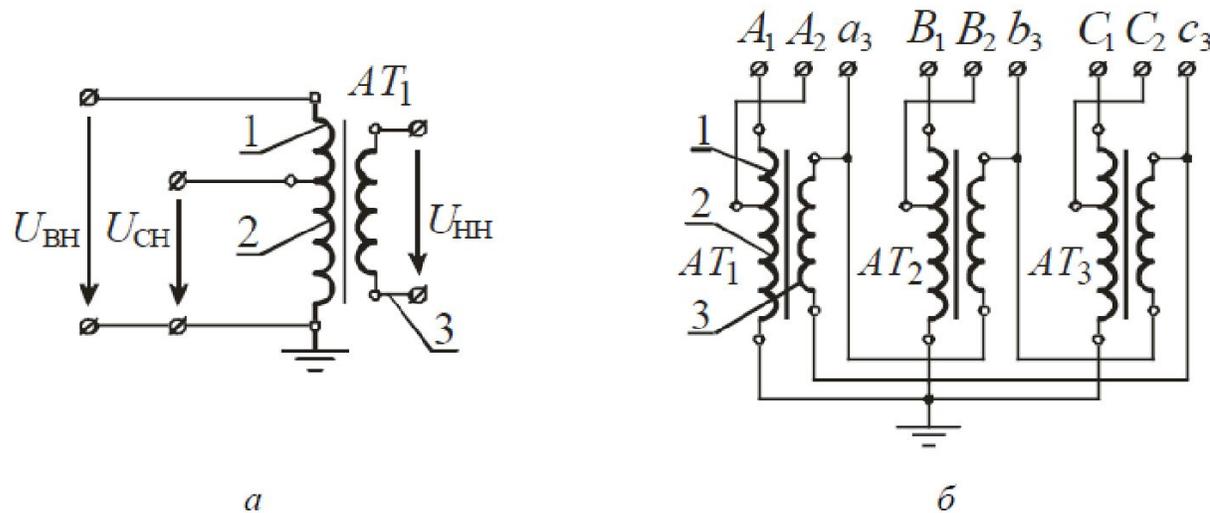


Рис. 4. Принципиальные схемы трехобмоточных автотрансформаторов: *а* – однофазного; *б* – трехфазной группы автотрансформаторов

Автотрансформаторы могут работать в автотрансформаторных и комбинированных режимах. При работе в автотрансформаторном режиме мощность передаётся из сети ВН в сеть СН или наоборот. Третья обмотка НН при этом не нагружена. При работе в комбинированном режиме к обмотке НН автотрансформатора присоединяется нагрузка или компенсирующие устройства. При этом мощность в последовательной и общей обмотке состоит из мощности, передаваемой в автотрансформаторном режиме, и мощности, передаваемой через обмотку НН.

В отличие от трансформатора, где вся мощность с первичной обмотки ВН передается на вторичную обмотку СН магнитным полем, в автотрансформаторе часть мощности передается непосредственно – без трансформации, через электрическую (контактную) связь между последовательной и общей обмотками (электрическая мощность):

$$S_{эл} = \sqrt{3} \cdot U_{с_{НОМ}} \cdot I_{В_{НОМ}},$$

а также с помощью пронизывающего их магнитного потока, т. е. магнитным путем (трансформаторная мощность)

$$S_{тр} = \sqrt{3} \cdot (U_{В_{НОМ}} - U_{с_{НОМ}}) I_{В_{НОМ}} \approx \sqrt{3} \cdot U_{с_{НОМ}} (I_{с_{НОМ}} - I_{В_{НОМ}}).$$

Сумма трансформаторной и электрической мощности равна проходной мощности автотрансформатора:

$$S_{пр} = S_{тр} + S_{эл} = \sqrt{3} \cdot (U_{В_{НОМ}} - U_{с_{НОМ}}) I_{В_{НОМ}} + \sqrt{3} \cdot U_{с_{НОМ}} \cdot I_{В_{НОМ}}$$

Под номинальной мощностью автотрансформатора понимается предельная мощность, которая может быть передана через автотрансформатор по обмоткам ВН и СН, имеющим между собой автотрансформаторную связь.

Для отечественных автотрансформаторов мощности обмоток ВН и СН одинаковые и равны номинальной или проходной.

$$S_{НОМ} = S_{пр} = \sqrt{3} U_{В_{НОМ}} I_{с_{НОМ}} = \sqrt{3} U_{с_{НОМ}} I_{с_{НОМ}}.$$

В общей обмотке протекает разность токов сетей ВН и СН. Поэтому эту обмотку рассчитывают на ток меньше номинального тока автотрансформатора, определяемого на стороне ВН, и она может иметь меньшую площадь сечения, чем обмотка того же напряжения двухобмоточного трансформатора.

Меньшую площадь имеет и магнитопровод автотрансформатора. В результате, чем ближе к единице коэффициент трансформации тем меньше расход активных материалов (меди обмоток, стали магнитопровода и изоляционных материалов) и приблизительно – стоимость автотрансформатора. Поэтому понижающие автотрансформаторы оказываются дешевле трансформаторов равной номинальной мощности, а применение автотрансформаторов взамен трансформаторов становится тем выгоднее, чем ближе друг к другу напряжения $U_{ВН}$ и $U_{СН}$.

$$k_{вс} = k = U_{ВН} / U_{СН} = I_{СН} / I_{ВН},$$

Мощность общей части обмоток 2 автотрансформатора где $\alpha_{в} = (1 - 1/k) = 1 - U_{СН}/U_{ВН}$ – так называемый коэффициент выгодности.

$$\begin{aligned} S_{общ} &= \sqrt{3} U_{СН} (I_{СН} - I_{ВН}) = \sqrt{3} U_{ВН} I_{ВН} \left(\frac{I_{СН}}{I_{ВН}} - 1 \right) \frac{U_{СН}}{U_{ВН}} = \\ &= S_{НОМ} (k - 1) \cdot \frac{1}{k} = S_{НОМ} \left(1 - \frac{1}{k} \right) = S_{НОМ} \cdot \alpha_{в}, \end{aligned}$$

Для характеристики автотрансформаторов введено также понятие типовой мощности, на которую рассчитывается последовательная обмотка:

$$\begin{aligned} S_{посл} = S_{тип} &= \sqrt{3} (U_{ВН} - U_{СН}) I_{ВН} = \\ &= \sqrt{3} U_{ВН} I_{ВН} \left(1 - \frac{U_{СН}}{U_{ВН}} \right) = S_{НОМ} (1 - 1/k) = \alpha \cdot S_{НОМ}, \end{aligned}$$

$$\text{т. е. } S_{общ} = S_{посл} = S_{тип}.$$

Типовая мощность отображает экономическую сторону конструкции автотрансформаторов, т. е. расход активных материалов. Различие техникоэкономических показателей трансформаторов и автотрансформаторов зависит от соотношения между номинальной и типовой (расчетной) мощностью, т. е. от коэффициента выгоды α_B .

Поскольку

$$\alpha_B = \frac{S_{\text{тип}}}{S_{\text{ном}}} = 1 - \frac{U_{\text{сн}}}{U_{\text{вн}}} = \frac{U_{\text{вн}} - U_{\text{сн}}}{U_{\text{вн}}},$$

то очевидно, что преимущества автотрансформатора проявляются в большей степени тогда, когда с его помощью связываются сети более близкие по номинальным напряжениям.

Мощность обмотки НН, обычно равную 50 % номинальной мощности автотрансформатора, рассчитывают на передачу типовой мощности.

$$S_{\text{НН}} = S_{\text{тип}} = \sqrt{3}U_{\text{НН}}I_{\text{НН}}.$$

В отдельных автотрансформаторах мощность обмотки НН составляет 20, 25 и 40 % и не равна типовой мощности. В этом случае коэффициент выгоды $\alpha_B = (1 - U_{\text{сн}}/U_{\text{вн}})$ не равен отношению $\alpha = S_{\text{НН}}/S_{\text{вн}}$, именуемому в дальнейшем коэффициентом приведения (пересчета).

Обмотка НН соединяется в треугольник, что способствует подавлению третьей гармоники фазных ЭДС, предотвращая их появление в линиях. Третья обмотка (НН) предназначена для питания нагрузок, расположенных в районе рассматриваемой подстанции, а также для подключения компенсирующих реактивную мощность устройств (батарей конденсаторов, синхронных компенсаторов и др.). Номинальное напряжение третьей обмотки в зависимости от удаленности нагрузок может быть 6,6; 11 и 38,5 кВ.

Наличие электрической связи между обмотками ВН и СН обуславливает возможность применения автотрансформаторов только в сетях с глухозаземленной нейтралью, т. е. в сетях напряжением 110 кВ и выше, а сами автотрансформаторы изготавливают с высшим напряжением не менее 150 кВ и средним 110 кВ. При отсутствии заземления нейтрали и замыкания на землю одной фазы в сети ВН потенциал относительно земли двух других фаз сети СН повысится до недопустимого значения. Если, например, выполнить автотрансформатор напряжением 115/38,5/11 кВ с изолированной нейтралью, то при замыкании на землю фазы А сети 110 кВ потенциал относительно земли фаз а и с сети 35 кВ повысится до $3,5U_{ср}$. Это недопустимо как для изоляции обмотки 38,5 кВ автотрансформатора, так и аппаратуры сети 35 кВ.

Расчетная схема замещения трехобмоточного автотрансформатора, представляющая собой трехлучевую звезду с сопротивлениями обмоток ВН– $R_{в}$, $X_{в}$, СН– $R_{с}$, $X_{с}$, НН– $R_{н}$, $X_{н}$, аналогична схеме замещения трехобмоточного трансформатора. Автотрансформаторы, как и трехобмоточные трансформаторы, характеризуются потерями активной мощности (ΔP_x) и токами холостого хода ($I_x = I_{\mu}$). Сопротивления обмоток автотрансформаторов, так же как и трансформаторов, определяют по табличным данным трех опытов короткого замыкания.

При коротком замыкании обмотки НН, мощность которой меньше номинальной $S_{ном}$ автотрансформатора, напряжение поднимается до значения, определяющего в этой обмотке ток, соответствующий номинальной мощности $S_{нн}$ обмотки НН, а не номинальной мощности автотрансформатора $S_{ном}$.

При коротком замыкании на стороне СН напряжение на стороне ВН может подняться до значения, при котором ток в последовательной обмотке достигает значения, определяющего номинальную мощность автотрансформатора.

В связи с этим паспортные данные автотрансформаторов на пару обмоток ΔP_k в-с приводятся отнесенными к номинальной мощности автотрансформатора, а значения ΔP_k в-н и ΔP_k с-н (обозначим в виде $\Delta P_k'$) – к номинальной мощности обмотки НН:

$$\Delta P_k' = 3I_{нн}^2 R_{в-н} = \frac{S_{нн}^2}{U_n^2} R_{в-н}$$

которые необходимо пересчитать к номинальной мощности автотрансформатора:

$$\Delta P_{\text{к в-н}} = 3I_{\text{НОМ ат}}^2 R_{\text{в-н}} = \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{н}}^2} R_{\text{в-н}}.$$

получим

$$\Delta P_{\text{к в-н}} = \Delta P'_{\text{к в-н}} \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НН}}^2} = \frac{\Delta P'_{\text{к в-н}}}{\alpha^2},$$

где $\alpha = S_{\text{НН}}/S_{\text{НОМ}}$ – коэффициент приведения.

$$\Delta P_{\text{к с-н}} = \Delta P'_{\text{к с-н}} \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НН}}^2} = \frac{\Delta P'_{\text{к с-н}}}{\alpha^2},$$

После этого расчет активных сопротивлений автотрансформатора выполняют по формуле $R_{\text{в}} = R_{\text{с}} = R_{\text{н}} = \frac{1}{2} \Delta P_{\text{к в-н}} U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2$, предварительно определив по выражениям

$$\Delta P_{\text{кв}} = \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{к в-с}} + \Delta P_{\text{к в-н}} - \Delta P_{\text{к с-н}}),$$

$$\Delta P_{\text{кс}} = \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{в-с}} + \Delta P_{\text{кс-н}} - \Delta P_{\text{к в-н}}),$$

$$\Delta P_{\text{кн}} = \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{к в-н}} + \Delta P_{\text{к с-н}} - \Delta P_{\text{к в-с}}).$$

потери короткого замыкания соответствующих обмоток. Если заданы потери короткого замыкания на одну пару

обмоток, например величина $\Delta P_{\text{к в-с}}$, то расчет выполняют по выражениям $R_{\text{в}} = R_{\text{с}} = R_{\text{н}} = \frac{1}{2} \Delta P_{\text{к в-н}} U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}}^2$.

, если известны потери $\Delta P_{\text{к в-н}}$, то, учитывая, что

$$R_{\text{в н}} = R_{\text{в}} + R_{\text{н}} = R_{\text{в}} + \frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{НН}}} R_{\text{в}} = \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha} \right) R_{\text{в}},$$

определяют сопротивления автотрансформатора по формулам

$$R_{\text{в}} = R_{\text{с}} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{\Delta P_{\text{к в-н}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}; \quad R_{\text{н}} = \frac{1}{\alpha} R_{\text{в}}.$$

Реактивные сопротивления лучей X_B , X_C , X_H схемы замещения вычисляются с помощью соответствующих выражений. При этом напряжения короткого замыкания u_{KB-H} , u_{KC-H} , отнесенные к номинальной мощности третьей обмотки

$$u'_{KB-H} \% = \sqrt{3} I_{HH} X_{B-H} \cdot \frac{1}{U_{НОМ}} \cdot 100 = S_{HH} \cdot X_{B-H} \cdot \frac{1}{U_{НОМ}^2} \cdot 100,$$

$$u'_{KC-H} \% = \sqrt{3} I_{HH} X_{C-H} \cdot \frac{1}{U_{НОМ}} \cdot 100 = S_{HH} \cdot X_{C-H} \cdot \frac{1}{U_{НОМ}^2} \cdot 100$$

должны быть приведены к номинальной мощности автотрансформатора:

$$u_{KB-H} \% = \sqrt{3} I_{НОМ} X_{B-H} \cdot \frac{100}{U_{НОМ}} = S_{НОМ} \cdot X_{B-H} \cdot \frac{100}{U_{НОМ}^2},$$

$$u_{KC-H} \% = \sqrt{3} I_{НОМ} X_{C-H} \cdot \frac{100}{U_{НОМ}} = S_{НОМ} \cdot X_{C-H} \cdot \frac{100}{U_{НОМ}^2}.$$

получим значения, приведенные к номинальной мощности автотрансформатора:

$$u_{KB-H} = u'_{KB-H} \cdot \frac{S_{НОМ}}{S_{HH}} = \frac{u'_{KB-H}}{\alpha}, \quad u_{KC-H} = u'_{KC-H} \cdot \frac{S_{НОМ}}{S_{HH}} = \frac{u'_{KC-H}}{\alpha}.$$

В технических справочниках, как правило, даются уже приведенные значения u_{KB-H} и u_{KC-H} , которые непосредственно подставляют в формулы для определения индуктивного сопротивления.

Если одно из них, например u_{KC} , будет нулевым или близким к нулю, то табличные данные автотрансформатора являются приведенными к номинальной мощности автотрансформатора.

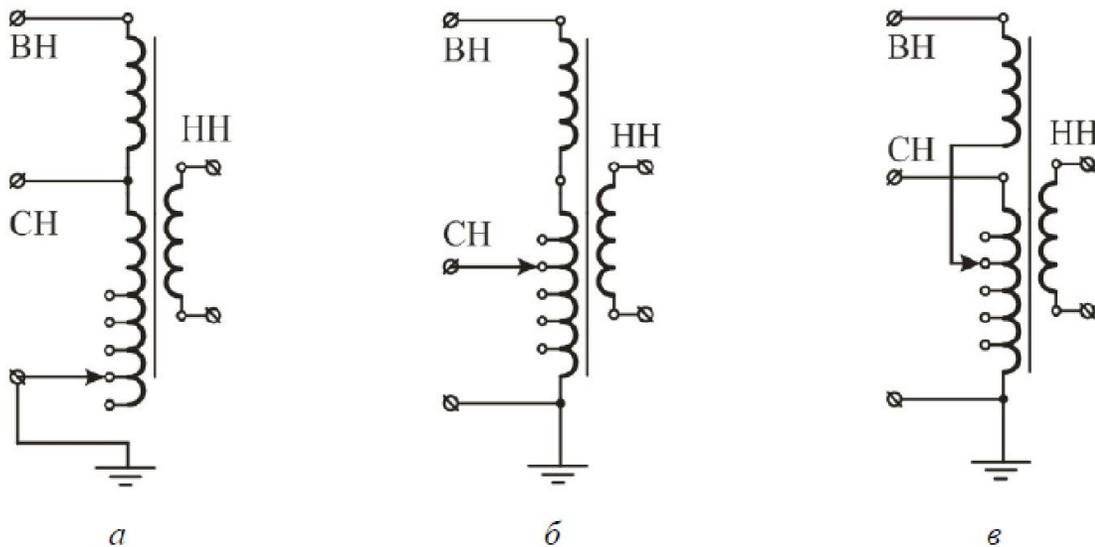


Рис. 5. Принципиальные схемы: *а* – автотрансформатора с РПН в нейтрали обмоток; *б* – на стороне СН; *в* – на стороне ВН

Трехобмоточные автотрансформаторы имеют несколько вариантов регулирования напряжения под нагрузкой (РПН): в нейтрали обмоток ВН и СН (рис. 5, *а*), на выводах обмотки СН (рис. 5, *б*) либо со стороны ВН (рис. 5, *в*). При задании трансформации идеальными трансформаторами в схеме замещения следует учитывать расположенные РПН. Для автотрансформаторов с РПН в общей нейтрали обмоток коэффициенты трансформации определяются следующим образом:

$$k_{\text{в-с}} = \frac{U_{\text{ВН}} \pm \delta U}{U_{\text{СН}} \pm \delta U}, \quad k_{\text{в-н}} = \frac{U_{\text{ВН}} \pm \delta U}{U_{\text{НН}}}, \quad k_{\text{с-н}} = \frac{U_{\text{СН}} \pm \delta U}{U_{\text{НН}}}.$$

В случае автотрансформаторов с РПН только на ступени СН:

$$k_{\text{в-с}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}} \pm \delta U}, \quad k_{\text{в-н}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}, \quad k_{\text{с-н}} = \frac{U_{\text{СН}} \pm \delta U}{U_{\text{НН}}}.$$

При установке РПН на стороне ВН определим коэффициенты трансформации в виде

$$k_{\text{в-с}} = \frac{U_{\text{ВН}} \pm \delta U}{U_{\text{СН}}}, \quad k_{\text{в-н}} = \frac{U_{\text{ВН}} \pm \delta U}{U_{\text{НН}}}, \quad k_{\text{с-н}} = \frac{U_{\text{СН}}}{U_{\text{НН}}}.$$

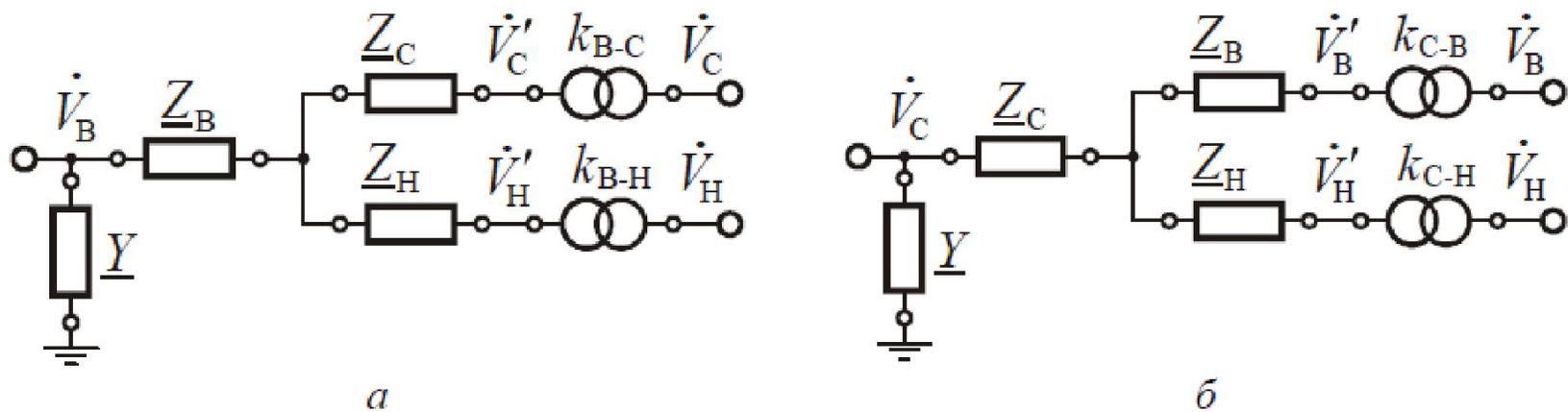


Рис. 6. Схемы замещения автотрансформатора:
a – при направлении потока ВН–СН;
б – при направлении потока СН–ВН

В этих выражениях δU – добавочное напряжение при переходе на ответвления, при которых коэффициент трансформации отличается от номинального.

В схемах замещения автотрансформатора (рис. 6) используются только два коэффициента трансформации, например k_{B-C} и k_{B-H} в случае (*a*), когда поток мощности направлен от ВН к СН, k_{C-B} и k_{C-H} в случае (*б*), если поток мощности имеет направление СН–ВН.

Проводимости поперечных ветвей, как и двухобмоточного трансформатора, вычисляют по формулам

$$G_{\tau} = \frac{\Delta P_{\text{х}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3}.$$

$$B_{\tau} = \frac{\Delta Q_{\text{х}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{I_{\text{х}}}{100 \%} \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^{-3},$$