

# Схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов.

Теоретические положения и методика расчета.

- Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях при относительно невысоком напряжении (до 24 кВ), и ее передача на большие расстояния при этом напряжении неэкономична. Достаточно сказать, что потери мощности обратно пропорциональны квадрату напряжения и прямо пропорциональны квадрату тока. Поэтому передача электрической энергии на расстояние осуществляется на повышенном напряжении. В месте потребления электрической энергии напряжение опять должно быть понижено до напряжения электроприемника. Таким образом, схема передачи электрической энергии выглядит, как на рисунке 1.

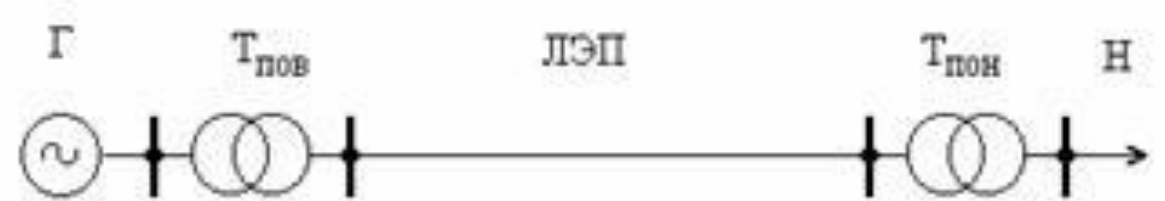
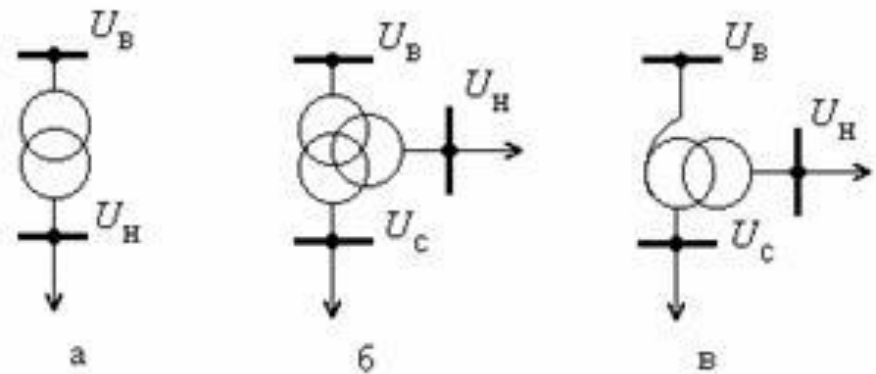


Схема электропередачи (Г – генератор, Т<sub>пов</sub> и Т<sub>пон</sub> – повышающий и понижающий трансформаторы, Н – нагрузка)

- Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с двумя или более обмотками и предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.
- Преимущественное распространение имеют трехфазные трансформаторы. При сверхвысоком напряжении применяют и однофазные трансформаторы, соединенные в трехфазные группы. На подстанциях электрической сети применяют понижающие двух- и трехобмоточные трансформаторы. Трехобмоточные трансформаторы имеют по три обмотки в каждой фазе и связывают сети трех номинальных напряжений.
- Условные обозначения трансформаторов показаны на рисунке 2.



Обозначения трансформаторов:  
 а – двухобмоточный, б – трехобмоточный, в – автотрансформатор

- Математические модели трансформаторов наиболее просто изображаются в виде схем замещения. Самой простой и адекватной моделью в расчетах электрических сетей является Г-образная схема замещения. Как правило, схемы замещения трехфазных устройств изображаются для одной фазы. Для двухобмоточного трансформатора его Г-образные схемы замещения представлены на рисунках 3 и 4.

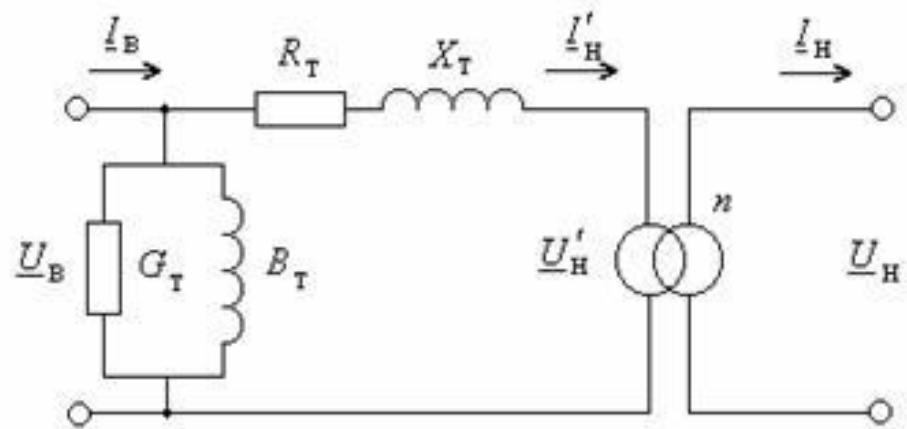


Рис. 3. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

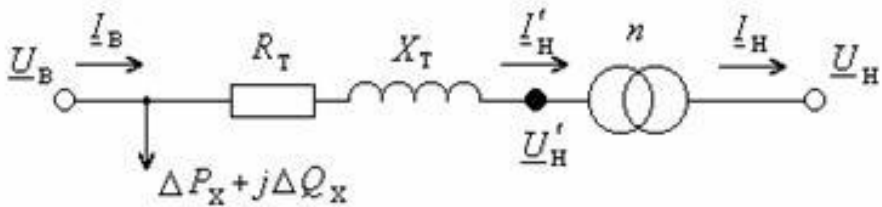


Рис. 4. Упрощенная схема замещения двухобмоточного трансформатора

- Так как обмотки трансформатора имеют разное напряжение, то продольный элемент схемы замещения состоит из суммарных сопротивлений обеих обмоток трансформатора, приведенных к одному напряжению. Обычно приведение делается к стороне высшего напряжения.

• Тогда при

- В схемы замещения на рис. 3, 4 включена идеальная веточка трансформации, характеризуемая величиной коэффициента трансформации. Иногда для простоты эта веточка опускается, но в расчетах схем электрических сетей без приведения параметров к одному напряжению веточка трансформации всегда подразумевается.
- Схема замещения трехобмоточного трансформатора с представлением ветви потерь холостого хода постоянной мощностью показана на рис. 5.

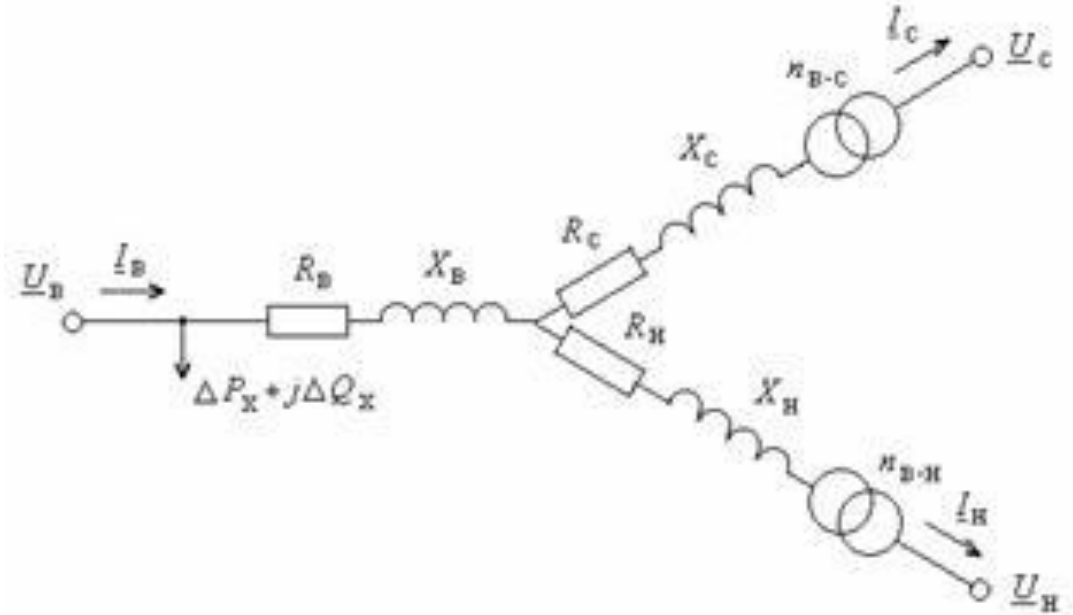


Рис. 5. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

- В паспортных данных трансформаторов наряду с номинальным напряжением и номинальной мощностью даются еще следующие параметры: потери короткого замыкания ( $DP_k$  в киловаттах) и напряжение короткого замыкания ( $U_k$  в процентах), определенные из опыта короткого замыкания, а также потери холостого хода ( $DP_x$  в киловаттах) и ток холостого хода ( $I_x$  в процентах), определенные из опыта холостого хода.
- $DP_k$  – потери активной мощности в обмотках трансформатора при номинальном токе, расходуемые на нагрев;
- $U_k$  – напряжение, равное падению напряжения на активном и реактивном сопротивлении трансформатора при номинальном токе, определяется для какой-либо пары обмоток на одной из них при закороченной второй при протекании по ней номинального тока и дается в процентах от номинального напряжения;
- $DP_x$  – потери активной мощности, вызванные перемагничиванием и вихревыми токами в стали трансформатора при номинальном токе, расходуемые на нагрев сердечника;
- $I_x$  – ток в одной из обмоток, включенной на номинальное напряжение при остальных разомкнутых обмотках. Ток холостого хода создает намагничивающую мощность, необходимую для получения магнитного потока, и дается в процентах от номинального тока.
- Эти данные позволяют определить все сопротивления и проводимости схемы замещения трансформатора.

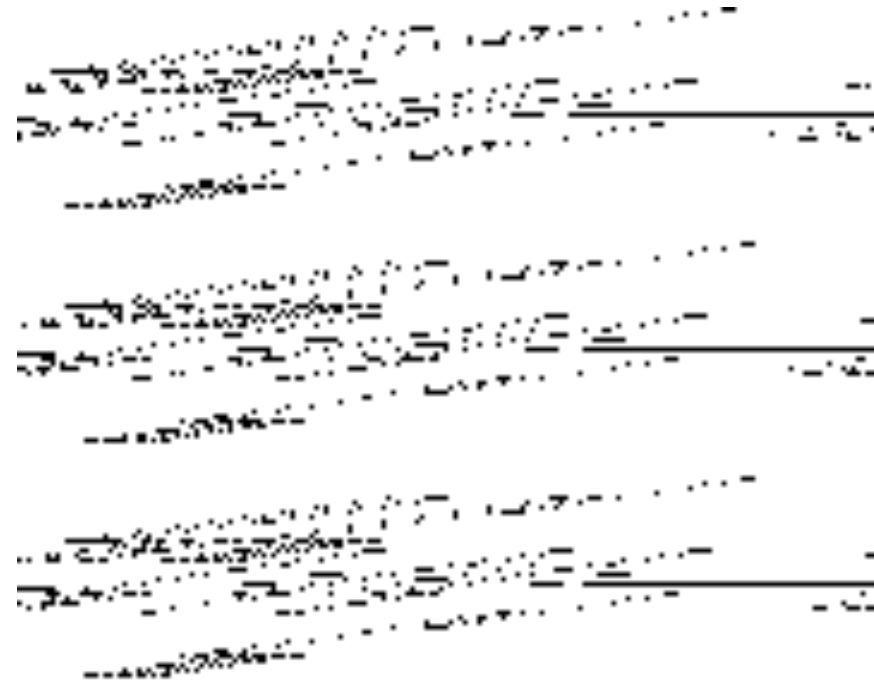
- Активное сопротивление –  $R_t$ . Потери активной мощности двухобмоточного трансформатора в его обмотках, определяемые из опыта короткого замыкания:
- Полная номинальная мощность трансформатора:
- где  $U_{ном}$  – линейное номинальное напряжение, отсюда:

$$S_{ном} = \frac{P_{кз}}{U_{ном}}$$



- Раньше трехобмоточные трансформаторы изготавливались в трех исполнениях. В одном из них каждая из обмоток рассчитывалась на номинальную мощность  $S_B = S_C = S_H = S_{ном}$  (соотношения между мощностями обмоток 100/100/100 \%), в двух других одна или две обмотки рассчитывались на мощность, в 1,5 раза меньшую, чем мощность обмотки высокого напряжения, которая во всех случаях равна  $S_{ном}$  (соотношения соответственно 100/100/66,7 \%, 100/66,7/100 \% и 100/66,7/66,7 \%). С 1985 г. трехобмоточные трансформаторы изготавливаются только с соотношениями мощностей обмоток 100/100/100 \%.

При проведении трех опытов короткого замыкания, поочередно замыкая одну из обмоток при отсутствии нагрузок у других, получаем  $D_{PK}$  в-с,  $D_{PK}$  в-н,  $D_{PK}$  с-н, через которые можно определить суммарные сопротивления двух обмоток:



Решая эти три уравнения относительно  
неизвестных сопротивлений обмоток, получаем

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} - R_2 - R_3$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} - R_1 - R_3$$

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3} - R_1 - R_2$$

- В случае задания в справочных данных одного ДРК активное сопротивление находится через соотношения мощностей обмоток.

Например, если задана ДРК в-с, то для соотношения 100/100/100  $R_B = R_C = R_H$  и, следовательно: \_\_\_\_\_

- Откуда: \_\_\_\_\_
- Если соотношение 100/100/66,7, то:  $R_B = R_C$ , а  $R_H = 1,5R_B$ .

- Для определения активного сопротивления автотрансформатора необходимо рассмотреть схему соединения его обмоток, которая показана на рис. 6.

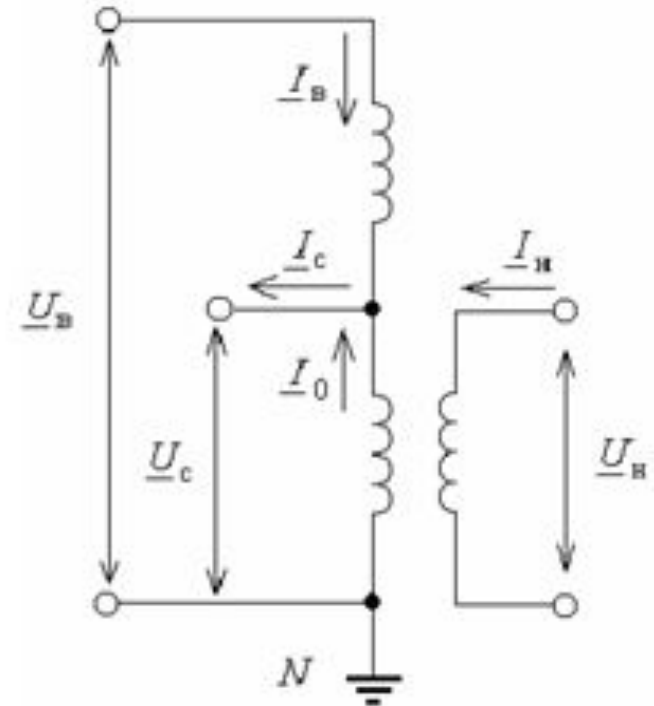


Рис. 2.6. Схема соединений обмоток автотрансформатора

- Обмотка низкого напряжения автотрансформатора связана с другими обмотками только электромагнитной связью. Эта обмотка рассчитана на значительно (50 \% и ниже) меньшую мощность, чем номинальная. Через обмотки высокого и среднего напряжения за счет наличия электрической связи между ними можно передавать номинальную мощность. Мощность, передаваемую в автотрансформаторе электромагнитным путем, называют типовой. Эта мощность вычисляется через так называемый коэффициент выгоды автотрансформатора:

$$P_{\text{тип}} = \frac{P_{\text{ном}}}{k_{\text{выг}}}$$

- При этом активные сопротивления обмоток могут быть определены через соотношения мощностей обмоток, как в трехобмоточном трансформаторе, при условии если задано одно  $DP_k$ . В случае задания трех  $DP_k$  возникает необходимость пересчета  $DP'_k$  в-н, и  $DP'_k$  с-н к номинальной мощности. Это связано с тем, что обмотка низкого напряжения рассчитана на  $S_{тип}$ , и при проведении опыта короткого замыкания это необходимо учитывать, в результате чего  $DP_k$  оказывается приведенным к  $S_{тип}$ :

$$DP'_k = DP_k \frac{S_{ном}}{S_{тип}}$$
$$DP'_k = DP_k \frac{S_{ном}}{S_{тип}}$$

где величины со штрихами соответствуют заводским (справочным) данным.

- Дальнейший расчет активных сопротивлений обмоток выполняется так же, как у трехобмоточного трансформатора.
- Индуктивное сопротивление –  $X_t$ .
- Падение напряжения в реактивном сопротивлении двухобмоточного трансформатора в процентах от номинального
- Подставив в данное уравнение значение тока через  $S_{ном}$ , получим:
- $\Delta U_a = \frac{I^2 R_{акт}}{U_{ном}}$
- Падение напряжения  $\Delta U_a$  в активном сопротивлении мощных трансформаторов, применяемых в электрических сетях, мало по сравнению с  $\Delta U_p$ . Поэтому можно считать  $U_k$  приближенно равным  $\Delta U_p$ , тогда:

$$U_k \approx \Delta U_p$$



- Для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов  $U_k$  дается для каждой пары обмоток в процентах от номинального:  $U_k$  в-н,  $U_k$  в-с,  $U_k$  с-н. Поэтому расчет  $X_v$ ,  $X_s$ ,  $X_n$  аналогичен расчету активных сопротивлений при задании трех  $D_{Pk}$ .
- Активная и реактивная проводимости –  $G_t$  и  $B_t$ .
- Расчет активной и реактивной проводимости трансформатора:
- Так как  $I_x$  имеет небольшую активную составляющую  $I_a$ , которая определяет потери активной мощности в стальном магнитопроводе и меньше реактивной  $I_r$  в 4-6 раз, то можно принять реактивную составляющую, равную току  $I_r \approx I_x$ , тогда:

$$G_t = \frac{3 \cdot I_a^2}{U_n^2} \quad B_t = \frac{3 \cdot I_r^2}{U_n^2}$$

- Выражая  $I_{ном}$  через  $S_{ном}$ , после преобразования получаем:
- Где  $P_{хх}$  – потери реактивной мощности холостого хода.

$$P_{хх} = \frac{3 \cdot I_r^2 \cdot R_{лв}}{U_n^2}$$