

УДК 681.783.323.3

МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ

Дашковский А.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Мышковец Е.В.

Рассмотрим математические модели силовых трансформаторов, которые применяются в задачах, связанных с расчётом установившихся режимов схем электрических сетей. Получим математическую модель однофазного двухобмоточного трансформатора. Вначале предположим, что трансформатор не имеет магнитопровода (воздушный трансформатор), тогда он может быть представлен схемой рис. 1, в которой активные сопротивления обмоток изображены отдельно.

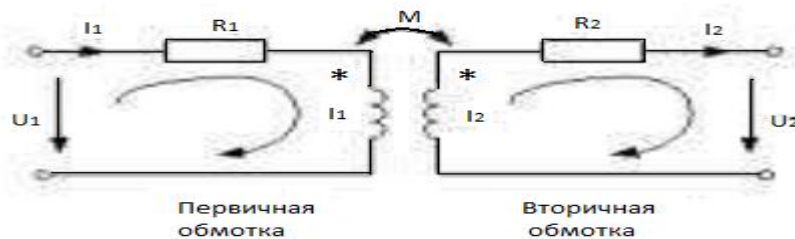


Рис.1 – Схема воздушного трансформатора

При обходе контуров на схеме рис. 1 в соответствии с заданными направлениями по второму закону Кирхгофа получим уравнения трансформатора в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ -U_2 &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

При синусоидальных токах и напряжениях уравнения (1) в комплексной форме записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 \\ -U_2 &= R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 - j\omega M I_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Эти уравнения равносильны следующим:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I_1 + j\omega(L_1 - M)I_1 - j\omega M(I_1 - I_2) \\ -U_2 &= R_2 I_2 + j\omega(L_2 - M)I_2 - j\omega M(I_1 - I_2) \end{aligned} \quad (3)$$

Последним уравнениям соответствует схема замещения рис. 2. В отличие от рис. 1 в схеме замещения первичная и вторичная цепи трансформатора связаны не индуктивно, а гальванически.

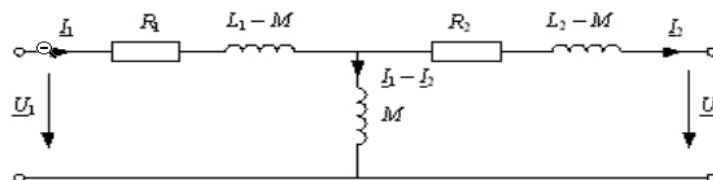


Рис.2 – Схема замещения

Входящие в схему рис. 2 разности $L_1 - M$ и $L_2 - M$ имеют физический смысл только при одинаковом числе витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток ($w_1 = w_2$).

В реальных трансформаторах для моделирования потерь в стали в схему замещения трансформатора вводят активную проводимость G_μ . Для моделирования эффекта намагничивания сердечника вводят реактивную проводимость B_μ .

Если взять за основу математической модели трансформатора так называемой идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации $n = \frac{w_1}{w_2}$, для которого относительная магнитная проницаемость равна бесконечности и ток намагничивания равен нулю, то добавлением к нему элементов, учитывающих основные паразитные эффекты, можно получить полную схему замещения трансформатора (рис. 3).

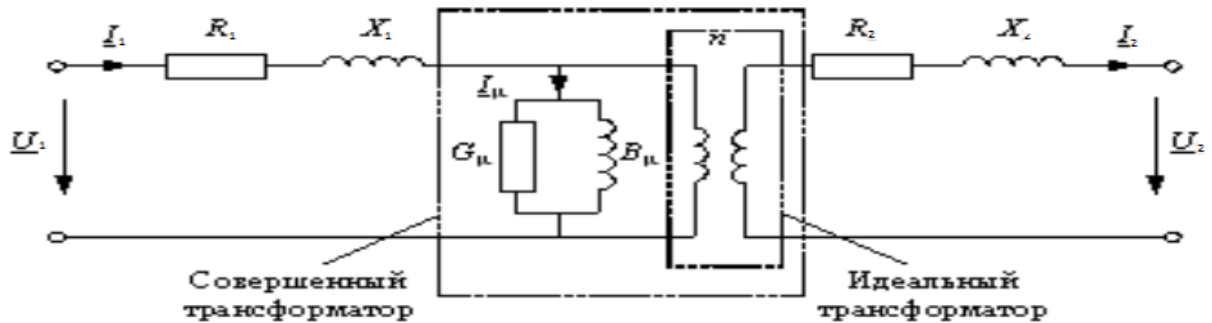


Рис.3 – Полная схема замещения трансформатора

Потери энергии в обмотках трансформатора при протекании по ним токов учитываются активными сопротивлениями R_1 и R_2 , последовательно с ними включены индуктивности рассеяния, которые учитывают эффект запасания энергии и наведения напряжения в обмотках от потоков рассеяния. Этим индуктивностям соответствуют индуктивные сопротивления обмоток X_1 и X_2 . Ток намагничивания обуславливает намагничивающую силу, которая создаёт поток взаимной индукции. Величина тока намагничивания I_μ пропорциональна напряжению первичной обмотки. Параллельно индуктивной проводимости намагничивания B_μ включают активную проводимость G_μ , учитывающую потери в сердечнике.

Таким образом, *идеальным трансформатором* является трансформатор, для которого при любых условиях $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = n$. Трансформатор, для которого при любой нагрузке $\frac{U_1}{U_2} = n$, называется *совершенным трансформатором* (рис. 3).

Во многих случаях пользуются приведенной Т-образной схемой замещения трансформатора (рис. 4). Получается она приведением сопротивлений вторичной обмотки к напряжению первичной обмотки по соотношениям:

$$U_2' = nU_2, I_2' = \frac{1}{n}I_2 \tag{4}$$

На схеме рис. 4 отмечены ток и напряжение:

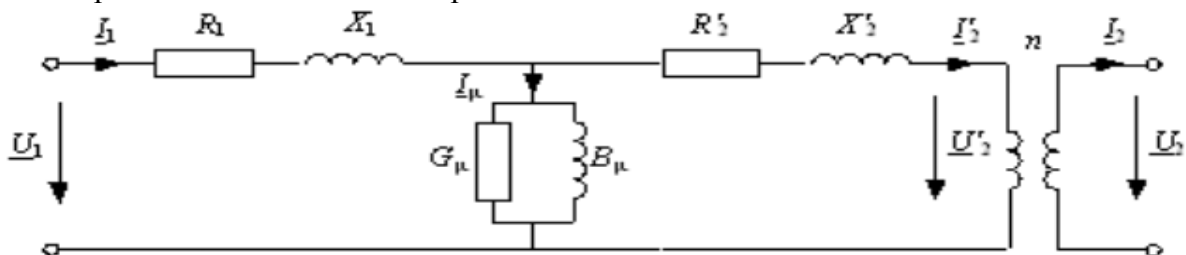


Рис.4 – Т-образная схема замещения

Обычно для силовых трансформаторов более целесообразна так называемая Г-образная схема замещения, элементы которой имеют простой физический смысл и могут быть вычислены или измерены.

Ветвь намагничивания переносится на зажимы первичной обмотки и оказывается включенной на напряжение U_1 . Это вносит погрешность в математическую модель, так как в действительности ток намагничивания протекает по первичной обмотке. Сопротивления первичной обмотки оказываются последовательно включёнными с приведенными сопротивлениями вторичной обмотки, и при их сложении получают так называемые сопротивления трансформатора R_T и X_T (рис.5): $R_T = R_1 + R_2'$, $X_T = X_1 + X_2'$

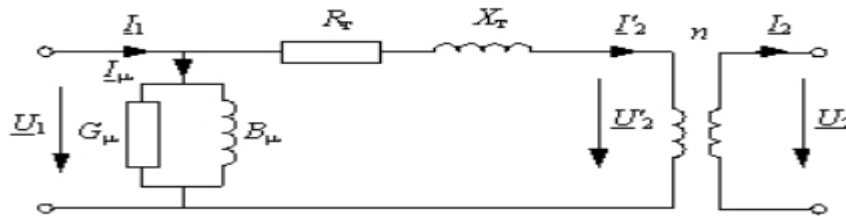


Рис.5 – Г-образная схема замещения

Полученная схема носит название Г-образной схемы замещения трансформатора и применяется для выполнения расчётов схем электрических сетей, где она ещё больше упрощается посредством представления ветви холостого хода в виде постоянных величин потерь активной и реактивной мощности на холостой ход (рис. 6).

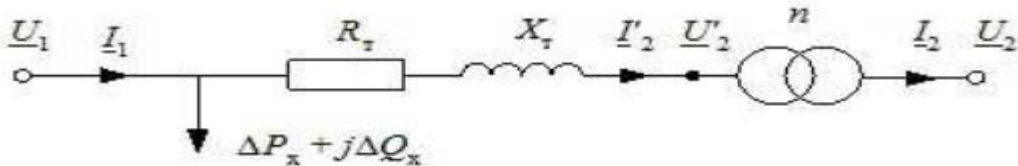


Рис.6 – Упрощённая схема замещения трансформатора

Всё полученное выше для однофазных трансформаторов можно распространить на каждую фазу трёхфазного трансформатора. Сопротивления и проводимости Г-образной схемы замещения трансформатора, приведены к напряжению обмотки первичного напряжения, определяются по формулам:

$$R_T = \frac{P_k U_{1ном}^2}{S_{ном}^2}, X_T = \frac{U_k U_{1ном}^2}{100 S_{ном}} \tag{5}$$

$$G_\mu = \frac{P_k}{U_{1ном}^2}, B_\mu = \frac{I_k S_{ном}}{100 U_{1ном}^2} = \frac{Q_x}{U_{1ном}^2}$$

Получим параметры П-образной схемы замещения (рис. 7) на основе Г-образной схемы замещения двухобмоточного понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $n > 1$ (рис.5)

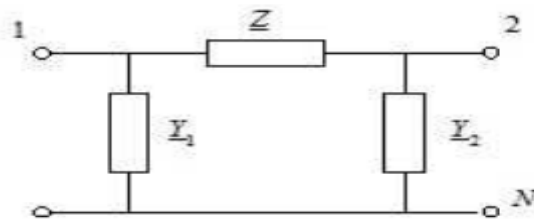


Рис.7 – П-образная схема замещения трансформатора

Найдём напряжение и ток первичной обмотки:

$$U_1 = nU_2 + \Delta U_T = nU_2 + (R_T + jX_T) \frac{I_2}{n} \tag{6}$$

$$I_1 = I_\mu + \frac{I_2}{n} = (G_\mu - jB_\mu)U_1 + \frac{I_2}{n} \tag{7}$$

После подстановки (6) в (7) получим:

$$I_1 = (G_\mu - jB_\mu)U_2 + \frac{1}{n}((R_T + jX_T)(G_\mu - jB_\mu) + 1)I_2 \tag{8}$$

Сопоставляя выражения (6) и (9) с уравнениями четырёхполюсника:

$$\begin{aligned} U_1 &= AU_2 + BI_2 \\ I_1 &= CU_2 + DI_2 \end{aligned} \tag{9}$$

Из полученных соотношений можно найти параметры П-образной схемы замещения трансформатора:

$$\begin{aligned} A &= 1 + ZY_2 = n \\ B &= Z = \frac{Z_T}{n} \end{aligned} \quad (10)$$

$$C = Y_1 + Y_1ZY_2 + Y_2 = nY_\mu$$

$$D = 1 + ZY_1 = \frac{1}{n}(1 + Z_TY_\mu)$$

$$Z = \frac{1}{Z_T}$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_T}(1 - n) + Y_\mu \quad (11)$$

$$Y_2 = \frac{n}{Z_T}(n - 1)$$

Литература

1. Сухарева Г.М. Г-образная и П-образная схемы замещения силового трансформатора – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ru.calameo.com/read/0026965040a579e704e45>