

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА

Китаев А.В., Глухова В.И.

Поведение трансформатора (ТР) в рабочем режиме можно исследовать экспериментальным путем. Но для этого нужен сам объект испытаний (ТР) и специальное лабораторное оборудование. Однако такая возможность есть не всегда и потому специалистам, например, при проектировании систем электроснабжения приходится решать ту же задачу расчетным путем, пользуясь данными каталога, в состав которых входят: номинальная мощность  $S_H$ ; номинальные напряжения входа и выхода  $U_{1H}, U_{2H}$ ; ток холостого хода  $I_{10}$  в процентах от номинального тока первичной обмотки  $I_{1H}$ ; напряжение испытательного режима короткого замыкания  $\Delta U_K$  в процентах от номинального значения  $U_{1H}$ ; мощность, потребляемая от сети в испытательных режимах х.х. и к.з.  $\Delta P_X$  и  $\Delta P_K$ , а также к.п.д.  $\eta$  номинального режима. Для решения указанной задачи разработаны специальные методики, которые приводятся в различных пособиях по электротехнике [1,2]. Однако они носят приближенный характер и могут быть использованы лишь при решении локальных задач.

Ниже рассмотрен другой подход, основанный на использовании метода эквивалентного генератора (МЭГ) и положений теории четырехполюсника. Причем основной акцент сделан на решение задач по определению параметров схемы замещения и на расчет характеристик ТР.

**Определение параметров и показателей работы схемы замещения**

Трансформатор часто называют типичным четырехполюсником (ЧП). А в качестве обоснования ссылаются на идентичность их Т-образных схем замещения (см. рис.1).

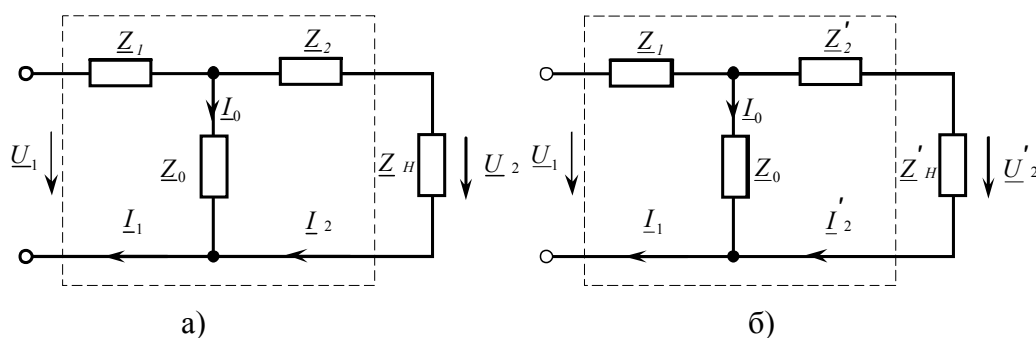


Рис. 1 Схемы замещения четырехполюсника и трансформатора

Внешне эти схемы, действительно, схожи. Однако по характеру работы они различны. В этом легко убедиться в результате рассмотрения аналитических выражений для определения тока выхода  $I_2$  и  $I'_2$ :

для ЧП

$$I_2 = \frac{U_{2X}}{Z_{BX} + Z_H}, \quad (1)$$

для ТР

$$I'_2 = \frac{U'_{2H}}{Z'_2 + Z'_H}, \quad (2)$$

где  $U_{2X} = U'_{2H}$  - напряжения на поперечной ветви в режиме х.х.;

$Z_H = Z'_H$  - полное комплексное сопротивление нагрузки;

$Z_{BX}$  - входное сопротивление ЧП со стороны зажимов выхода;

$Z'_2$  - полное комплексное сопротивление вторичной обмотки после приведения.

Формула (1) получена в результате сведения Т-образной схемы ЧП к схеме замещения активного двухполюсника согласно МЭГ, а формула (2) является иной формой записи основного уравнения ТР для вторичной цепи. Очевидно, что в оговоренных условиях обеспечить равенство  $\underline{I}_2$  и  $\underline{I}'_2$  будет иметь место только при  $\underline{Z}_{BX} = \underline{Z}'_2$ , что принципиально невозможно. Отсюда следует, что Т-образная схема ЧП – это обычная электрическая цепь со смешанным соединением элементов. В случае ТР – это схема устройства или ЧП, способного обеспечить стабилизацию напряжения на зажимах поперечной ветви. Нетрудно указать и механизм стабилизации: он построен на способности ТР сохранять неизменный магнитный поток в сердечнике при переменной нагрузке и сохранении  $U_{1H} = const$ .

Отмеченное обстоятельство способствует упрощению определения параметров схемы замещения ТР. Так сопротивления поперечной ветви находятся по формулам

$$Z_0 = \frac{U'_{2H}}{I_{10}}; R_0 = \frac{\Delta P_X}{I_{10}^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \varphi_0 = \arctg \frac{X_0}{R_0};$$

которые являются отражением реальной физической картины и могут считаться достаточно точными.

Аналогичная ситуация имеет место и при определении продольных сопротивлений  $Z_1$  и  $Z'_2$ , суммирование которых дает величину сопротивления короткого замыкания  $Z_K$ :

$$Z_K = \sqrt{3} \frac{\Delta U_K \% U_{1H}}{100 \% S_H}; R_K = 3 \frac{\Delta P_K U_{1H}^2}{S_H^2}; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \varphi_K = \arctg \frac{X_K}{R_K}.$$

Принято считать, что в ТР  $\underline{Z}_1$  примерно равно  $\underline{Z}'_2$ . Тогда можно записать, что  $Z_1 = Z'_2 = 0,5Z_K$ , и полагать, что все параметры схемы замещения найдены.

#### Определение сопротивления нагрузки номинального режима

Сложность решения этой задачи определена отсутствием информации по истинному значению коэффициента трансформации  $\kappa_T$  исследуемого устройства. Отсюда необходимость обращения к методу последовательных приближений и поиск требуемых показателей на основе графических построений. Прежде всего найдем приближенное значение  $\kappa_{ТП}$  по формуле  $\kappa_{ТП} = U_{1H} / U_{2H}$ . Это даст возможность определения приведенного номинального фазного напряжения на выходе трансформатора  $U'_{2H\Phi} = \kappa_{ТП} \frac{U_{2H}}{\sqrt{3}}$ . Тогда при за-

данном характере нагрузки ( $\cos \varphi_2$ ), пользуясь формулой  $Z'_H = U'_{2H\Phi} / I_{1H}$ , найдем также приближенное значение нагрузки номинального режима работы ТР. Далее зададимся рядом сопротивлений нагрузки равных, например, (0,75; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0)  $Z'_H$ . Это позволит определить эквивалентные сопротивления вторичной цепи ТР, соответствующие им токи  $I'_2$ , а также угол сдвига между векторами  $U'_{2H\Phi}$  и  $\underline{I}'_2$ :

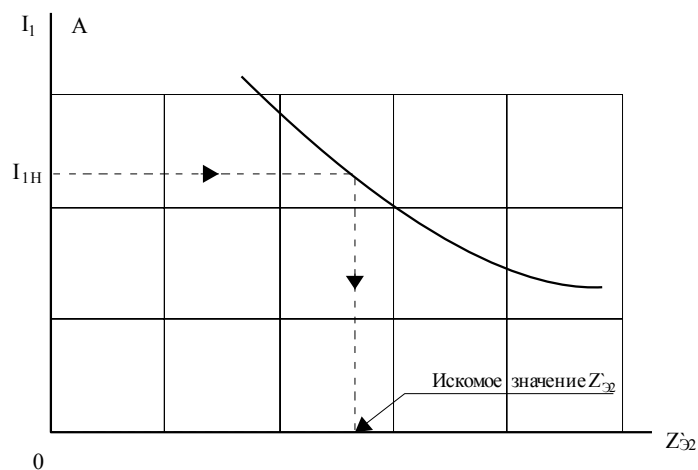
$$R'_{\varphi 2} = 0,5Z_K \cos \varphi_K + Z'_H \cos \varphi_2; X'_{\varphi 2} = 0,5Z'_K \sin \varphi_2; Z'_{\varphi 2} = \sqrt{R'^2_{\varphi 2} + X'^2_{\varphi 2}};$$

$$I'_2 = \frac{U'_{2H\Phi}}{Z'_{\varphi 2}}; \psi_2 = \arctg \frac{0,5Z_K \sin \varphi_K + Z'_H \sin \varphi_2}{0,5Z_K \cos \varphi_K + Z'_H \cos \varphi_2}.$$

В итоге получим ряд значений тока  $I'_2$  и их пространственное положение на комплексной плоскости. Векторное суммирование  $\underline{I}'_2$  с током  $\underline{I}_{10}$  даст токи  $\underline{I}_1$ , модули которых можно найти при использовании теоремы косинусов

$$I_1 = \sqrt{I_{10}^2 + I'^2_2 + 2I_{10}I'_2 \cos(\varphi_0 - \psi_2)}$$

В итоге может быть построена вспомогательная графическая зависимость  $I_1 = f(Z'_{\varphi 2})$ . Ее иллюстрация приведена на рис. 2.


 Рис. 2 Зависимость  $I_1 = f(Z'_{32})$ 

Если на оси ординат отложить известное значение  $I_{1H}$ , а затем провести линию параллельную оси абсцисс вплоть до пересечения с кривой  $I_1 = f(Z'_{32})$ , то точка их пересечения даст уже точную величину  $Z'_{32}$  при номинальном режиме работы ТР. Одновременно будут установлены значения  $\psi_2$  и  $I'_2$  того же режима. Отсюда нетрудно найти  $Z'_H$  и его составляющие  $R'_H, X'_H$ :  $R'_H = Z'_{32} \cos \psi_2 - 0,5Z_K \cos \varphi_K$ ,  $X'_H = Z'_{32} \sin \psi_2 - 0,5Z_K \sin \varphi_K$ ,  $Z'_H = \sqrt{R'^2_H + X'^2_H}$ . При умножении  $I'_2$  на  $Z'_H$  получим падение напряжения на нагрузке  $U'_{2\phi}$ , необходимое при построении векторной диаграммы ТР (см. рис.3).

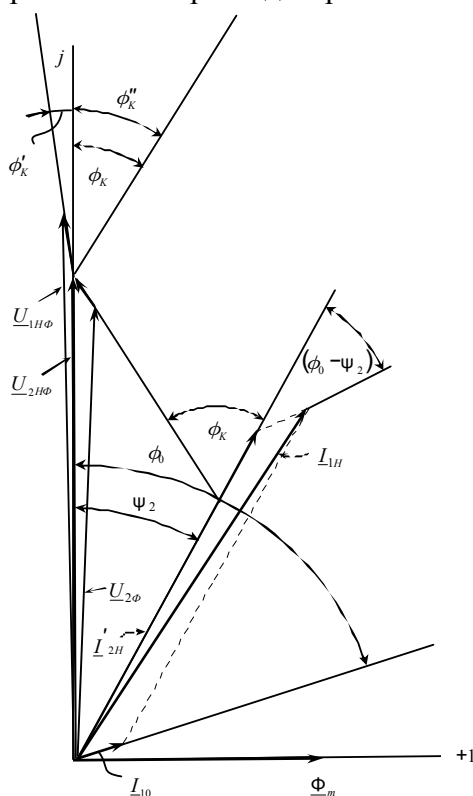


Рис. 3 Векторная диаграмма номинального режима работы трансформатора

Последняя, как известно, завершается изображением вектора напряжения сети  $U_{1\phi}$ , который находится в результате суммирования векторов  $U'_{2H\phi}$  и  $0,5Z_K I_{1H}$ . Модуль  $U_{1\phi}$  можно также найти путем использования теоремы косинусов

$$U_{1\phi} = \sqrt{U_{2H\phi}^2 + (0,5Z_K I_{1H})^2 + U_{2H\phi} Z_K I_{1H}}$$

Однако полученное значение  $U_{1\phi}$  будет превышать заданную по каталогу величину  $U_{1H\phi} = U_{1H} / \sqrt{3}$ . Связано это с тем, что расчет был построен на использовании явно завышенного значения коэффициента трансформации. Отсюда диктуется необходимость повторения расчетов при более низких коэффициентах трансформации согласно изложенной выше методике. В итоге будем располагать зависимостью  $U_{1\phi} = f(k_T)$ , графическое изображение которой приведено на рис.4.

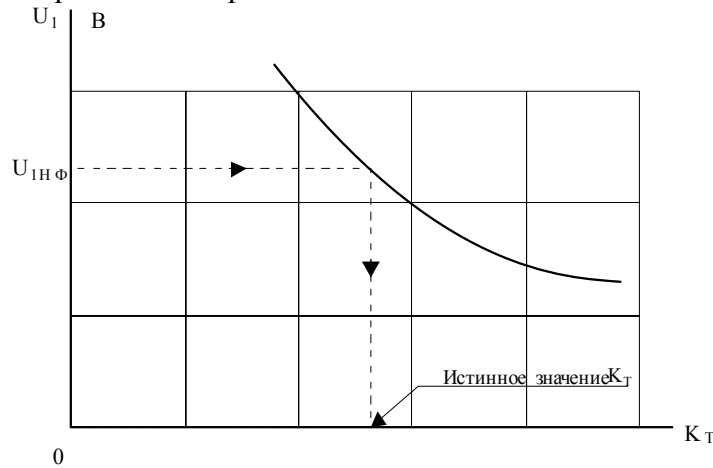


Рис. 4 Зависимость  $U_1 = f(k_T)$

Используя ее, найдем истинное значение  $k_T$ , что позволит выполнить завершающий этап работы по определению  $Z'_H$  и всех остальных показателей номинального режима, необходимых для построения векторной диаграммы.

**Исследование поведения трансформатора при переменной нагрузке**

Принято полагать, что нагрузка ТР и электрических генераторов меняется лишь по модулю при сохранении своего аргумента. Однако в качестве независимой переменной обычно выбирают не модуль сопротивления нагрузки, а модуль протекающего по ней тока. Принято рассматривать применительно к ТР следующие три характеристики: внешнюю, изменение вторичного напряжения и к.п.д. При описании электрических машин этот перечень существенно шире и дополнен такими показателями, как потребляемый из сети ток, мощности входа и выхода, коэффициент мощности и др.

Очевидно, что согласно принципам системности и преемственности единение теории трансформаторов и электрических машин должно обеспечивать и унификацию их исследуемых характеристик. Это означает, что число характеристик ТР должно быть увеличено. Их перечень приведен в таблице 1.

Таблица 1

Соотношения для расчета характеристик трансформатора

№ п/п	Наименование характеристики или зависимости	Аналитическое соотношение
1	Внешняя характеристика $\gamma_2 = f(\beta)$	$\gamma_2 = 1 - k_i \beta \cos \varphi$
2	Изменение вторичного напряжения $\Delta\gamma_2 = f(\beta)$	$\Delta\gamma_2 = k_i \cos \varphi$
3	Ток первичной обмотки $\beta_1 = f(\beta)$	$\beta_1 = \sqrt{\alpha_0^2 + \beta^2 + 2\alpha_0\beta \cos(\varphi_0 - \psi_2)}$ $\psi_2 = \arctg \frac{Z'_H \sin \varphi_2 + 0,5Z_k \sin \varphi_k}{Z'_H \cos \varphi_2 + 0,5Z_k \cos \varphi_k}$
4	Активная мощность нагрузки $p_2 = f(\beta)$	$p_2 = \beta \cos \psi_2 - \beta^2 k_i \cos \varphi_k$
5	Активная мощность на входе $p_1 = f(\beta)$	$p_1 = \beta \cos \psi_2 + \beta^2 k_i \cos \varphi_k + p_0$
6	Характеристика КПД $\eta = f(\beta)$	$\eta = \frac{p_2}{p_1}$

№ п/п	Наименование характеристики или зависимости	Аналитическое соотношение
7	Коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = f(\beta)$	$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\beta_1}$
Принятые обозначения: $k_i = \frac{I'_{2н}}{I'_{2кз}}$ ; $I'_{2кз} = \frac{U'_{2нф}}{Z_k}$ ; $\varphi = \varphi_k - \varphi_2$ ; $\alpha_0 = \frac{I_{10}}{I'_{2н}}$ ; $p_0 = \frac{\Delta P_{xx}}{U'_{2н} \cdot I'_{2н}}$		

Там же даны аналитические выражения для расчете предлагаемых зависимостей в относительных значениях. Получены они при использовании МЭГ. Графическое изображение перечисленных характеристик приведено на рис. 5.

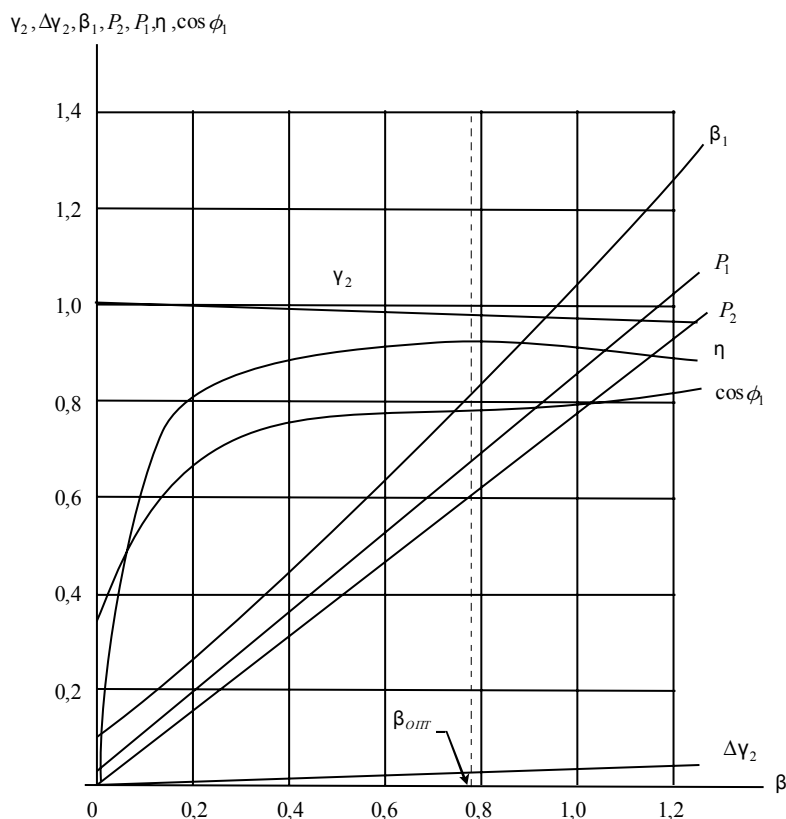


Рис. 5 Характеристики трансформатора

**Выводы**

1. Справочные данные по ТР, приведенные в каталогах, позволяют выполнить полное и подробное исследование работы устройства, начиная с определения параметров схемы замещения, вплоть до построения зависимостей поведения основных показателей при переменной нагрузке.

2. Обращение к методу эквивалентного генератора выгодно тем, что придает аналитическим соотношениям по расчету показателей работы ТР простоту, компактность и другие удобства.

The digit-by-digit algorithm of research of transformer is in-process resulted from reference data which over are brought in a catalogue. Tasks are solve on definition of parameters of chart of substitution, loading resistance of the nominal mode and to the conduct of indexes of work of transformer at the variable loading.

1. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. - М.: Энергоатомиздат, 1987. -528 с.
2. Пиотровский Л.М. Электрические машины. -Л.: "Энергия", 1975. -504 с.