

Расчет характеристик маломощных трансформаторов по каталожным данным

ГРИДИН В.М.

Предложен алгоритм расчета характеристик маломощных (до 5 кВА) трансформаторов при заданных значениях напряжения питания, частоты его изменения, тока и характера (косинуса) нагрузки без применения итерационных процедур, с использованием только каталожных данных; для таких трансформаторов указывается меньше сведений, чем для трансформаторов большей мощности. Расчеты заменяют определение характеристик трансформаторов экспериментальным путем. В расчетном алгоритме характеристик предусмотрено определение параметров схемы замещения и мощности потерь холостого хода и короткого замыкания трансформаторов, а также учет нелинейной зависимости тока холостого хода от напряжения питания. Нелинейность учитывается в расчетах относительного значения магнитного потока в магнитопроводе, относительного значения намагничивающего тока по относительной характеристике намагничивания и тока холостого хода. Предложенный алгоритм позволяет рассчитывать характеристики трансформаторов любой мощности. Приведен пример расчета характеристик трансформаторов по каталожным данным.

Ключевые слова: трансформатор малой мощности, характеристики, алгоритм расчета, условия работы трансформаторов, пример расчета

Трансформаторы малой мощности (менее 4 кВА в однофазном и менее 5 кВА в трехфазном исполнении) применяются в устройствах радиотехники, электроники, автоматики, связи, для понижения напряжения с целью обеспечения безопасности работы, питания бытовых электроприборов, низковольтных цепей сигнализаций и выпрямителей [4].

В известной литературе, например в [1–5], не приводятся алгоритмы расчётов характеристик трансформаторов только по каталожным данным, они не используются, например, в выражениях для вторичного напряжения и потребляемого тока. Приведенные в известной литературе выражения используются при изучении и проектировании трансформаторов, но не позволяют рассчитывать характеристики реальных, например серийных, трансформаторов. Определение характеристик трансформаторов по каталожным данным заменяет получение их экспериментальным путем.

Цель настоящей работы – получение алгоритма расчета характеристик маломощных трансформаторов для заданных значений напряжения питания, частоты его изменения, тока и характера (косинуса) нагрузки без применения итерационных процедур, с использованием только каталожных данных.

В каталогах для маломощных трансформаторов указаны номинальные значения первичного и вторичного напряжения (номинальные фазные значения первичного и вторичного напряжения обозна-

чим $U_{1Н}$ и U_{20}), значения частоты изменения первичного напряжения f_H , полной отдаваемой мощности S_H , а также относительных значений тока холостого хода i_0 и напряжения короткого замыкания u_K . Такие данные приведены, например, в [4] для трансформаторов типа ОСМ. Напряжение U_{20} – фазное вторичное напряжение при холостом ходе трансформатора, обычно оно в 1,05 раз больше номинального фазного напряжения потребителей ($U_{20} = 1,05U_{2Н}$).

Для расчета характеристик трансформаторов, кроме каталожных данных и значений фазного первичного напряжения U_1 , фазного тока нагрузки I_2 и косинуса нагрузки $\cos\varphi_2$, необходимо знание и значений активного и индуктивного сопротивлений короткого замыкания, мощности потерь холостого хода и короткого замыкания, а для трансформаторов с насыщенным магнитопроводом – также относительной характеристики намагничивания магнитопровода.

Ниже приведен алгоритм расчета характеристик трансформаторов по каталожным данным, состоящий из двух разделов. В первом разделе приведен расчет характеристик для номинального режима работы трансформаторов, во втором – для ненормального режима; в этом разделе использованы отдельные результаты расчетов из первого раздела. При составлении алгоритма используем схему замещения и векторную диаграмму трансформатора.

(В дальнейшем курсивом показано происхождение отдельных выражений.)

На рис. 1 изображена упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы трансформатора. Согласно [4] «параметры асинхронных машин (и трансформаторов) таковы, что переход от Т-образной схемы к упрощенной Г-образной схеме не приводит к появлению заметных погрешностей».

На рис. 1 обозначено: r_k, x_k – активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания; Z_1 – комплексное сопротивление первичной обмотки; Z_0 – комплексное сопротивление поперечной ветви для Т-образной схемы замещения трансформатора; U_1 – фазное напряжение на первичной обмотке; I_{1x} – фазный ток холостого хода; I'_2 – фазный ток во вторичной обмотке и нагрузке, приведенный к первичной обмотке; U'_2 – фазное напряжение на вторичной обмотке и нагрузке, приведенное к первичной обмотке; I_1 – потребляемый ток; Z' – комплексное сопротивление нагрузки трансформатора, приведенное к первичной обмотке. При активной нагрузке трансформаторов $Z' = R$.

На рис. 2 изображена векторная диаграмма трансформатора.

Расчет характеристик для номинального режима работы трансформаторов. Значения характеристик трансформаторов рассчитываем в следующей последовательности.

Коэффициент трансформации напряжений

$$n = U_{1H} / U_{20} = U_{1H} / (1,05U_{2H}).$$

Номинальное фазное напряжение на вторичной обмотке и нагрузке, приведенное к первичной обмотке,

$$U'_2 = U'_{2H} = nU_{2H}.$$

Номинальное значение фазного тока во вторичной обмотке и нагрузке для активной нагрузки трансформатора

$$I_{2H} = S_H / (mU_{2H}),$$

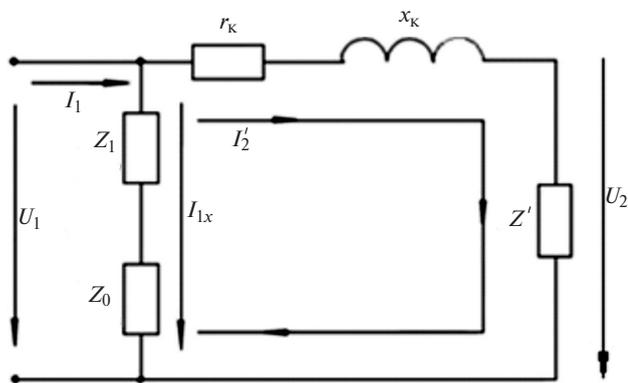


Рис. 1. Г-образная схема замещения одной фазы трансформатора

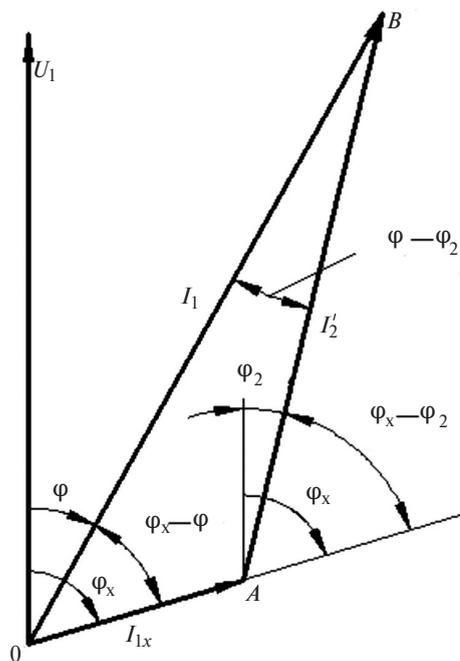


Рис. 2. Векторная диаграмма трансформатора

где m – число фаз трансформатора.

Номинальный фазный ток во вторичной обмотке и нагрузке, приведенный к первичной обмотке,

$$I'_2 = I'_{2H} = I_{2H} / n.$$

Согласно [4] угол между векторами U_1 и U'_2 пренебрежимо мал. При активной нагрузке трансформатора угол между векторами U'_2 и I'_2 равен нулю, поэтому угол φ_2 между векторами U_1 и I'_2 (см. рис. 2) также пренебрежимо мал. Это учитываем в формулах для параметров и характеристик трансформатора.

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = (U_{1H} - U'_{2H}) / I'_{2H}.$$

Мощность потерь короткого замыкания

$$\Delta P_k = m I_{2H}^2 r_k.$$

Мощность потерь холостого хода [4]

$$\Delta P_x = \beta_0^2 \Delta P_k,$$

где β_0 – оптимальное значение коэффициента β нагрузки трансформатора по току и мощности, при котором КПД трансформатора η максимален; $\beta = I_2 / I_{2H} = I'_2 / I'_{2H}$. Реальные значения: $\beta_0 \approx 0,5 \div 0,7$, $\beta_0^2 \approx 0,25 \div 0,5$. Выбор значения β_0 влияет на точность расчета характеристик трансформаторов весьма незначительно, так как $\Delta P_x \ll S_H + \Delta P_k$. Для трансформаторов большой мощности значения ΔP_x и ΔP_k указаны в каталогах, поэтому их не надо рассчитывать.

Формулы для тока I_{1H} и $\cos\varphi_H$ получим из двух уравнений. Первое уравнение получим из условия баланса мощностей для активной нагрузки трансформатора:

$$I_{1H} \cos\varphi_H = (S_H + \Delta P_X + \Delta P_K) / (m U_{1H}) = C.$$

Второе найдем из рассмотрения треугольника ОАВ на векторной диаграмме применительно к номинальному режиму работы трансформатора для активной нагрузки, когда угол φ_2 пренебрежимо мал (см. выше):

$$I_{1X} = i_0 I_{1H} = \sqrt{I_{1H}^2 + I_{2H}'^2 - 2 I_{1H} I_{2H}' \cos\varphi_H}.$$

Из двух уравнений получим одно:

$$(1 - i_0^2) I_{1H}^2 + I_{2H}'^2 - 2 C I_{2H}' = 0.$$

Решение уравнения представляет собой выражение для номинального первичного (потребляемого) тока:

$$I_{1H} = \sqrt{\frac{2 C I_{2H}' - I_{2H}'^2}{1 - i_0^2}}.$$

Номинальное значение фазного тока холостого хода

$$I_{1X} = i_0 I_{1H}.$$

Из рассмотрения треугольника ОАВ на векторной диаграмме применительно к номинальному режиму работы трансформатора для активной нагрузки, когда угол φ_2 пренебрежимо мал (см. выше), получим выражение:

$$\cos\varphi_X = (C - I_{2H}') / I_{1X}.$$

Угол между векторами U_1 и I_{1X} (см. рис. 2)

$$\varphi_X = \arccos(\cos\varphi_X).$$

Значение I_{1H} можно уточнить, пересчитав мощность потерь холостого хода по формуле

$$\Delta P_X = m U_{1H} I_{1X} \cos\varphi_X,$$

а также значение величины C . Но эта мощность влияет на характеристики трансформаторов незначительно, так как $\Delta P_X \ll S_H + \Delta P_K$;

$$\cos\varphi_H = C / I_{1H}.$$

Сопротивление короткого замыкания

$$z_K = u_K U_{1H} / I_{1H}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

Угол

$$\varphi_K = \arctg x_K / r_K.$$

Сопротивления Z_0 и $Z_1 + Z_0 = (1,02 \div 1,06) Z_0$ в расчетах характеристик трансформаторов не участвуют.

Номинальные значения активной мощности в нагрузке, потребляемой мощности и КПД трансформатора:

$$P_{2H} = S_H \text{ (для активной нагрузки);}$$

$$P_{1H} = m U_{1H} I_{1H} \cos\varphi_H; \eta_H = P_{2H} / P_{1H}.$$

Расчет характеристик для ненормального режима работы трансформаторов. Рассчитываем характеристики трансформаторов для заданных значений фазного напряжения питания U_1 , тока нагрузки I_2 и $\cos\varphi_2$. При этом используем отдельные результаты расчетов для номинального режима. Характеристики трансформаторов рассчитываем в следующей последовательности.

Ток во вторичной обмотке, приведенный к первичной обмотке,

$$I_2' = I_2 / n.$$

Коэффициент нагрузки трансформатора по току и мощности

$$\beta = I_2 I_{2H}' = I_2' / I_{2H}'.$$

Угол между векторами вторичных напряжения и тока

$$\varphi_2 = \arccos(\cos\varphi_2).$$

Относительное изменение напряжения на вторичной обмотке [4]:

$$\Delta u \approx \beta u_K \cos(\varphi_K - \varphi_2).$$

Напряжение на вторичной обмотке, приведенное к первичной обмотке,

$$U_2' \approx U_1 (1 - \Delta u).$$

Напряжение на вторичной обмотке

$$U_2 = U_2' n.$$

Ток холостого хода

$$I_{1X} \approx i_0 I_{1H} (U_1 / U_{1H})^2.$$

Множитель $(U_1 / U_{1H})^2$ учитывает приближенно нелинейную зависимость тока I_{1X} от напряжения питания U_1 . Более точный учет показан в *Приложении*. Указанное рекомендуется для трансформаторов с насыщенным магнитопроводом.

Как и для номинального режима работы трансформаторов формулы для тока I_1 и $\cos\varphi$ получим из двух уравнений. Предварительно рассчитаем:

$$P_2 = mU_2 I_2 \cos\varphi_2; \Delta P_k = \beta^2 m I_{2H}'^2 r_k;$$

$$\Delta P_x = \beta_0^2 (U_1 / U_{1H})^2 m I_{2H}'^2 r_k;$$

$$D = (P_2 + \Delta P_k + \Delta P_x) / (mU_1).$$

Множитель $(U_1 / U_{1H})^2$ учитывает пропорциональность магнитного потока напряжению питания U_1 , а магнитных потерь, т.е. ΔP_x , — квадрату магнитного потока.

Первое уравнение получим из условия баланса мощностей:

$$I_1 \cos\varphi = I_1 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = D.$$

Второе — из рассмотрения треугольника OAB на векторной диаграмме применительно к ненормальному режиму работы трансформатора:

$$I_{1x} = \sqrt{I_1^2 + I_2'^2 - 2I_1 I_2' \cos(\varphi - \varphi_2)}.$$

Учитывая, что $\cos(\varphi - \varphi_2) = \cos\varphi \cos\varphi_2 + \sin\varphi \sin\varphi_2$, из двух уравнений получаем одно:

$$I_1^4 + (2S - K^2) I_1^2 + S^2 + K^2 D^2 = 0,$$

где $K = 2I_2' \sin\varphi_2$; $S = I_2'^2 - I_{1x}^2 - 2DI_2' \cos\varphi_2$.

Решение уравнения представлено выражением для потребляемого тока:

$$I_1^2 = [K\sqrt{K^2 - 4(S + D^2)} + K^2 - 2S] / 2 = V,$$

$$I_1 = \sqrt{V}, \quad \cos\varphi = D / I_1.$$

Значения активной мощности в нагрузке, потребляемой мощности и КПД трансформатора:

$$P_2 = mU_2 I_2 \cos\varphi_2; P_1 = mU_1 I_1 \cos\varphi; \eta = P_2 / P_1.$$

Примечание. При активной нагрузке трансформатора ($\cos\varphi_2 = 1$) значение напряжения U_2' следует определять по более простой формуле $U_2' = U_1 - I_2' r_k$, а значения φ_2 и Δu рассчитывать не нужно.

Пример расчета характеристик трансформатора по каталожным данным. Однофазный трансформатор типа ОСМ-0,63 имеет следующие номинальные данные: $U_{1H} = 220$ В; $U_{20} = 42$ В; $U_{2H} = 40$ В; $S_H = 630$ В·А; $i_0 = 0,18$; $u_k = 0,09$. Значения напряжения питания и вторичного тока меньше номинальных: $U_1 = 0,9U_{1H} = 198$ В, $I_2 = 0,8I_{2H}$. Нагрузка трансформатора — активно-индуктивная: $\cos\varphi_2 = 0,8$. Ниже даны результаты расчетов характеристик трансфор-

матора: $n = 5,238$, $U_{2H}' = 209,5$ В, $I_{2H} = 15,75$ А, $I_{2H}' = 3,007$ А, $r_k = 3,492$ Ом, $\Delta P_k = 31,57$ Вт, $\beta_0 = 0,5$, $\Delta P_x = 7,89$ Вт, $C = 3,043$ А, $I_{1H} = 3,093$ А, $I_{1x} = 0,557$ А, $\cos\varphi_x = 0,0647$, $\varphi_x = 86^\circ 20'$, $\cos\varphi_H = 0,984$, $z_k = 6,402$ Ом, $x_k = 5,37$ Ом, $\varphi_k = 57^\circ$, $P_{2H} = S_H = 630$ Вт, $P_{1H} = 669,5$ Вт, $\eta_H = 0,94$, $I_2 = 12,60$ А, $I_2' = 2,406$ А, $\beta = 0,8$, $\varphi_2 = 37^\circ$, $\Delta u = 0,0677$, $U_2' = 184,6$ В, $U_2 = 35,20$ В, $I_{1x} = 0,451$ А, $P_2 = 355,3$ Вт, $\Delta P_k = 20,20$ Вт, $\Delta P_x = 6,4$ Вт, $D = 1,929$ А, $K = 2,89$ А, $S = -1,840$ А², $I_1^2 = 7,33$ А², $I_1 = 2,707$ А, $\cos\varphi = 0,713$, $P_2 = 355,3$ Вт, $P_1 = 381,9$ Вт, $\eta = 0,930$.

Приложение. Определение тока холостого хода с учетом нелинейной зависимости его от напряжения питания. Учет нелинейной зависимости тока холостого хода от напряжения питания эффективен (полезен) при повышенных значениях относительного тока холостого хода (не менее 0,3), которые характерны прежде всего для трансформаторов с насыщенным магнитопроводом. Выше приведена формула для тока холостого хода, приближенно учитывающая указанную зависимость:

$$I_{1x} \approx i_0 I_{1H} (U_1 / U_{1H})^2.$$

Более точный учет заключается в расчетах относительных значений магнитного потока в магнитопроводе, намагничивающего тока по относительной характеристике намагничивания и самого тока холостого хода [5, 6].

Относительное значение магнитного потока ϕ — отношение магнитного потока к номинальному значению потока:

$$\phi = U_1 / U_{1H},$$

так как магнитный поток пропорционален напряжению питания U_1 .

Намагничивающий ток — реактивная составляющая тока холостого хода. Относительное значение намагничивающего тока i — отношение намагничивающего тока к его номинальному значению.

Относительная характеристика намагничивания магнитопровода $\phi(i)$ обычно представляет собой полином k -й степени. Номинальному режиму работы трансформатора соответствует точка с координатами $i = 1$ и $\phi = 1$. Для трансформаторов со слабонасыщенным магнитопроводом она лежит несколько правее середины колена характеристики намагничивания [2], а для трансформаторов с более насыщенным магнитопроводом — еще правее середины колена характеристики. Положение указанной точки можно определить в результате испытаний серийного трансформатора.

Относительное значение намагничивающего тока i определяем как корень уравнения $\phi(i) = \phi_p = 0$, где ϕ_p – рассчитанное значение относительного магнитного потока ϕ , например с помощью программ MATLAB или MATCAD.

В частности, при $k=2$ характеристика $\phi(i)$ выражается формулой

$$\phi = -\alpha i^2 + \beta i + \gamma,$$

где $\alpha \approx 0,229$, $\beta \approx 0,988$, $\gamma \approx 0,242$ [6], из которой следует

$$i = [\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha(\phi - \gamma)}] / (2\alpha).$$

Последнюю используем для определения относительного значения тока i при аппроксимации характеристики намагничивания по трем точкам.

Определив значение i , рассчитаем искомое значение тока холостого хода [5]:

$$I_{1x} = i i_0 I_{1H}.$$

Elektrichestvo, 2019, No. 3, pp. 55–59

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белопольский Е.И., Каретникова Л.Г., Пикадова М.Н. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности, 3-е изд. М.: Альянс, 2013, 400 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. Л.: Энергия, 1974, 840с.
3. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, Логос, 2000, 607 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.
5. Гридин В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным. – *Электричество*, 2018, № 9, с. 44–48.
6. Гридин В.М. Расчет характеристик двигателей постоянного тока со смешанным возбуждением по каталожным данным. – *Электричество*, 2018, № 3, с. 38–43.

[06.06.2018]

Автор: Гридин Владимир Михайлович окончил Московский энергетический институт в 1963 г. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

DOI:10.24160/0013-5380-2019-3-55-59

Calculating the Characteristics of Low-Capacity Transformers from Their Catalogue Data

GRIDIN Vladimir M. (Moscow State Technical University Named N.E. Bauman, Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article proposes an algorithm for calculating the characteristics of low-capacity (up to 5 kVA) transformers for the given values of power supply voltage, its frequency, current, and load type (power factor) through the use of solely catalogue data and without resorting to iteration procedures (as is known, the datasheets provided for such transformers contain a fewer number of parameters than that for transformers of a larger capacity). The calculations make it possible to avoid the need of determining the transformer characteristics by experiment. The transformer characteristics computation algorithm includes means for determining the equivalent circuit parameters and the transformer no-load and short-circuit power losses, as well as means for taking into account the nonlinear dependence of the no-load current on the power supply voltage. The nonlinear characteristics are taken into account in calculating the relative magnetic flux value in the transformer core and in calculating the relative magnetization current value from the relative magnetization and no-load current characteristic. By using the proposed algorithm it is possible to calculate the characteristics of transformers of any capacity. An example of calculating the transformer characteristics from catalogue data is given.

Key words: low-capacity transformer, characteristics, computation algorithm, transformer operation conditions, calculation example

REFERENCES

1. Belopol'sky Ye.I., Karetnikova L.G., Pikadova M.N. *Raschet transformatorov i drossелей maloi moshchnosti, 3-ye izd.* (Calculation of transformers and chokes small power, 3rd edit.). Moscow, Al'yans, 2013, 400 p.
2. Vol'dek A.I. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Leningrad, Energiya, 1974, 840 p.
3. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Vysshaya shkola, Logos, 2000, 607 p.

4. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energiya, 1980, 928 p.
5. Gridin V.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 9, pp. 44–48.
6. Gridin V.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 3, pp. 33–43.

[06.06.2018]