

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В МЕДИ И СТАЛИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Плотников С.М., Колмаков О.В.

Ключевые слова: трансформатор, потери в стали, потери в меди.

Аннотация. Показано, что определяемые ваттметрическим методом потери в стали трансформаторов малой мощности содержат составляющую электрических потерь. Получены выражения для корректировки потерь.

ANALYSIS OF LOSSES IN COPPER AND STEEL IN LOW POWER TRANSFORMERS

Plotnikov S.M., Kolmakov O.V.

Keywords: transformer, losses in steel, losses in copper.

Abstract. It is shown that the losses determined by the wattmetric method in the steel of low-power transformers contain a component of electrical losses. Expressions are obtained for adjusting losses.

В соответствии с ГОСТ 19294-84, к трансформаторам малой мощности относятся сухие трансформаторы мощностью до 5 кВА, частотой 50 или 60 Гц с номинальным напряжением до 1000 В. Такие трансформаторы широко используются для питания радиоэлектронной аппаратуры, в устройствах централизации, автоматики, сигнализации и блокировок, для питания местного освещения и электроинструмента.

В однофазных трансформаторах малой мощности наблюдаются иные соотношения между потерями в стали и меди, чем в трехфазных силовых трансформаторах, что может привести к неверным результатам определения потерь холостого хода в них, искажает значение коэффициента оптимальной загрузки.

Сопротивление первичной обмотки однофазного трансформатора рассчитывается как половина активной составляющей сопротивления короткого замыкания

$$r_1 = \frac{P_{\kappa}}{2I_{1н}^2}, \quad (1)$$

где P_{κ} – потери в меди, определяемые опытом короткого замыкания;

$I_{1н}$ – номинальный ток первичной обмотки.

Ток холостого хода трансформатора определяется по паспортному значению тока холостого хода $I_0\%$

$$I_0 = \frac{I_0\% \cdot I_{1н}}{100}, \quad (2)$$

Электрические потери в обмотке от протекания этого тока

$$P_{\kappa\kappa} = r_1 \cdot I_0^2 = \frac{P_{\kappa}}{2I_{1н}^2} \left(\frac{I_0\%}{100} I_{1н} \right)^2 = \frac{P_{\kappa}}{2} \left(\frac{I_0\%}{100} \right)^2. \quad (3)$$

В трехфазных трансформаторах потери $P_{\text{кх}}$ распределены на три первичных обмотки, поэтому они втрое меньше, чем у однофазных. Кроме того, у силовых трансформаторов мал ток холостого хода и потери $P_{\text{кх}}$, рассчитанные по выражению (3), пренебрежимо малы по сравнению с потерями в стали.

Тока холостого хода трансформатора малой мощности может составлять до 30% от номинального тока первичной обмотки [1], поэтому электрические потери в первичной обмотке будут соизмеримы с магнитными потерями. Это искажает результаты опыта холостого хода, используемого для нахождения потерь в стали P_0 .

Рассмотрим данное искажение на примере однофазных сухих трансформаторов серии ОСМ1. Паспортные [2] и расчетные данные трансформаторов с учетом предельных отклонений КПД на -2%, I_0 на +30% и U_k на +20%, сведены в таблицу 1. Здесь величина $\frac{P_{\text{кх}}}{P_0} 100\%$ представляет собой погрешность определения потерь в стали.

Табл. 1.

S_n , ВА	η_n	P_0 , Вт	P_k , Вт	I_0 , %	$P_{\text{кх}}$, Вт	$\frac{P_{\text{кх}}}{P_0} 100\%$	U_k , %
63	0,810	2,4	9,6	31,2	0,47	19,5	15,6
100	0,850	3,0	12,0	31,2	0,58	19,5	10,8
160	0,862	4,4	17,7	29,9	0,79	18,0	8,4
250	0,882	5,9	23,6	28,6	0,96	16,3	5,6
400	0,912	7,1	28,1	26	0,95	13,4	5,4
630	0,925	9,5	37,7	24,7	1,16	12,2	4,8
1000	0,912	17,6	70,4	23,4	1,93	11,0	4,4
1600	0,930	22,4	89,6	16,9	1,28	5,7	4,2
2500	0,940	30	120	15,6	1,46	4,9	3,6

Оценим также влияние магнитных потерь в опыте короткого замыкания на потери в меди. Магнитные потери в данном опыте $P_{0\text{к}}$ пропорциональны квадрату магнитного потока [3], т.е. квадрату приложенного первичного напряжения

$$P_{0\text{к}} = \left(\frac{U_{\text{к}}\%}{100} \right)^2 P_0. \quad (4)$$

Для трансформатора ОСМ1-0,1 потери $P_{0\text{к}}$ составляют 0,035 Вт, это 0,3% от паспортных потерь в стали P_k , поэтому ими можно пренебречь.

Зависимости тока холостого хода и процентного отношения электрических и магнитных потерь на холостом ходу от мощности трансформаторов с учетом разброса их параметров представлены на рисунке 1. Здесь смежные номинальные мощности находятся на одинаковых расстояниях и изображены в «полулогарифмическом» масштабе, т.к.

соотношение между ними приблизительно одинаковое и составляет от 1,58 до 1,6.

Расчеты показывают, что для трансформаторов серии ОСМ1 электрические потери в первичной обмотке на холостом ходу могут составлять от 4% до 19,5% от магнитных потерь.

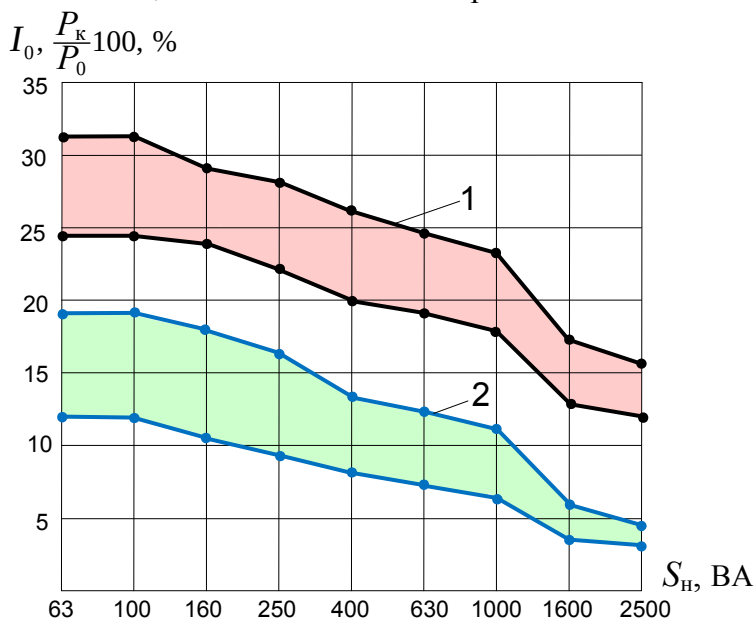


Рис. 1. Ток холостого хода (1) и погрешность определения потерь в стали (2) в зависимости от мощности трансформатора

Считается, что в опыте холостого хода показания ваттметра W_0 это потери в магнитопроводе P_0 . Фактически для трансформаторов рассмотренного диапазона мощностей следует корректировать данное значение согласно выражению

$$P_0 = W_0 - P_{кх} = W_0 - \frac{P_k}{2} \left(\frac{I_0 \%}{100} \right)^2. \quad (5)$$

Например, для трансформатора серии ОСМ1-0,1 номинальной мощностью 100 Вт определенные ваттметрическим методом потери холостого хода $W_0 = 3,0$ Вт, электрическая составляющая потеря при этом $P_{кх} = 0,58$ Вт. Тогда фактические потери в магнитопроводе равны 2,42 Вт.

Данная корректировка способствует более точному определению потерь в стали трансформатора, которые используются для оценки потерь на вихревые токи и на гистерезис и для расчета коэффициента оптимальной загрузки [4]. Результаты анализа применимы также для трансформаторов ОСВМ, ОСМ, ОСО, ОСОВ и других трансформаторов мощностью до 4 кВА.

Заключение

Для трехфазных силовых трансформаторов электрическая составляющая потерь в опыте холостого хода ничтожно мала по сравнению с магнитными

потерями, поэтому в данном опыте ваттметр показывает точное значение потерь в стали магнитопровода.

Указанные в паспортных данных потери холостого хода трансформаторов малой мощности содержат электрическую составляющую потерь в первичной обмотке и являются заниженными. При этом погрешность определения потерь в стали может составлять 19,5%. Для корректировки потерь в стали из показаний ваттметра в опыте холостого хода следует вычесть электрическую составляющую, которая пропорциональна квадрату тока холостого хода и номинальным потерями в меди трансформатора.

При определении потерь в меди магнитные потери в опыте короткого замыкания составляют доли процента, ими можно пренебречь.

Список литературы

1. Сидоров И.Н. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры: справочник. – М.: Радио и связь, 1994. – 320 с.
2. Справочник электрика и энергетика URL: <http://www.elecab.ru/trans.shtml>
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Курс электротехники. – М.: Высш. школа, 2005. – 542 с.
4. Плотников С.М., Колмаков О.В. Оптимизация работы трех параллельно работающих трансформаторов // Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса. – СПб: СПбФ НИЦ МС, 2019. – №2. – С. 67-69.

References

1. Sidorov I.N. Transformers of household electronic equipment: directory. – M.: Radio and communications, 1994. – 320 p.
2. Handbook of Electrical and Power Engineering URL: <http://www.elecab.ru/trans.shtml>
3. Kasatkin A.S., Nemtsov M.V. Electrical Engineering Course. – M.: Higher school, 2005. – 542 p.
4. Plotnikov S.M., Kolmakov O.V. Optimization of the work of three parallel-running transformers // Modernization and innovative development of the fuel and energy complex. – SPb: SPbB SRC MS, 2019. – No. 2. – P. 67-69.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Систем обеспечения движения поездов, smplochnikov@rabler.ru	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of Systems for train traffic, smplochnikov@rabler.ru
Колмаков Олег Витальевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Систем обеспечения движения поездов, kolmakov53@mail.ru	Kolmakov Oleg Vitalievich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of Systems for train traffic, kolmakov53@mail.ru
Красноярский институт железнодорожного транспорта, г. Красноярск, Россия	Krasnoyarsk Institute of railway transport, Krasnoyarsk, Russia

Received 09.12.2019