

**РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СТАЛИ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С УЧЕТОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

Иванов А.И., Петров Д.В., Сидоров О.С.

**CALCULATION OF MAGNETIC LOSSES OF ENERGY IN STEEL
OF POWER TRANSFORMERS
WITH THE ACCOUNT OF NON-INVISIBILITY OF MAGNETIC INDUCTION**

Ivanov A.I., Petrov D.V., Sidorov O.S.

Для определения магнитных потерь энергии в стали силовых трансформаторов (СТ), намагничивающей реактивной мощности и энергии, вызванной полным гармоническим составом амплитуды тока холостого хода, а также мощности и энергии искажения при несинусоидальности магнитной индукции, предлагается метод, основанный на численном использовании намагничивающей мощности СТ, коэффициенте формы кривой намагничивания и паспортных данных СТ.

Проведен расчет годовых потерь активной энергии в стали магнитопроводов СТ 10(6)/0,4кВ, 35/10(6) кВ, 110/10(6)кВ и 110/35/10(6) распределительных сетей (РЭС) Луганского региона и годового максимума реактивной энергии, затрачиваемой на намагничивание этих трансформаторов при нормально допустимом и предельно допустимом искажениях индукции.

Предложен ряд мероприятий для снижения реактивной составляющей тока холостого хода, уровня потерь энергии, затрачиваемой на намагничивание этих СТ.

Ключевые слова: трансформатор силовой трехфазный, годовые потери активной энергии в стали, годичный максимум реактивной энергии, годовые потери энергии искажения, гармонический состав, ток холостого хода

Введение. В настоящее время для учета потерь на транспортировку и передачу электрической энергии через силовые трансформаторы (СТ) распределительных и магистральных электрических сетей к потребителям электрической энергии используется методика [1], в которой предлагается рассчитывать потери активной $\Delta W_T^{(P)}$ и реактивной $\Delta W_T^{(Q)}$ электроэнергии, обусловленные действием основных гармоник синусоидального тока и напряжения, по следующим упрощенным формулам:

$$\Delta W_T^{(P)} = P_{к.з.} \cdot k_3^2 \cdot k_\phi^2 \cdot T_P + P_{х.х.} \cdot T_P; \quad (1)$$

$$\Delta W_T^{(Q)} = S_n \cdot \frac{U_{к.з.}}{100} \cdot k_3^2 \cdot k_\phi^2 \cdot T_P + S_n \cdot \frac{i_0}{100} \cdot T_P, \quad (2)$$

где $P_{к.з.}$ – потери короткого замыкания трансформатора, кВт;
 $P_{х.х.}$ – потери холостого хода трансформатора, кВт;
 S_n – номинальная мощность обмотки трансформатора, кВА;
 T_P – время работы оборудования на протяжении расчетного периода, в часах;
 $U_{к.з.}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;
 i_0 – ток холостого хода трансформатора, %;
 k_3^2 – коэффициент загрузки обмотки трансформатора;
 k_ϕ^2 – коэффициент формы графика нагрузки трансформатора.

Однако в [1] не учтены магнитные потери в стали СТ при несинусоидальной индукции в магнитной системе, намагничивающей мощности и энергии, вызванной полным спектром гармоник реактивной составляющей амплитуды тока холостого хода, а также расчет мощности и энергии искажения, вызванный различием в форме кривых тока и напряжения.

Указанные явления обусловлены нелинейной зависимостью стали магнитопровода в СТ за счет обратимого и скачкообразного необратимого смещения границ доменов и поэтому массово распространены в электрических сетях

В работах [2,3,4] расчет действующего значения намагничивающего тока i_0 приводится исключительно для первой–основной гармоники.

Причем действие и учет гармоник высшего порядка (гармоник, кратных трем, и гармоник $\nu = 5, 7, \dots$ и т.д.) из амплитуды намагничивающего тока i_{0r} согласно [2] исключается путем введения коэффициента формы (гармоник) k_f , учитывающего наличие высших гармоник при расчете основной составляющей намагничивающего тока:

$$I_{0r} = \frac{F}{k_a \cdot k_f \cdot w}, \quad (3)$$

где F – средняя намагничивающая сила одной фазы, А;

$k_a = 1,41$ – коэффициент амплитуды по [5];

w – число витков обмотки.

Также в большинстве работ определению мощности искажения T отводится незначительная роль, ограниченная упоминанием в следующей формуле:

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}, \quad (4)$$

где S – полная мощность, указанная на табличке трансформатора, $ВА$;

P – активная мощность или полезная мощность, $Вт$;

Q – реактивная мощность, $ВАр$.

Однако более точный учет мощности искажения T позволяет получить наглядное представление о потерях электроэнергии в СТ, возникающих в результате искажения гармоник фазных токов и напряжений, добавочных потерях, наиболее проявляющихся в результате действия вихревых токов при соединении обмоток СТ с разным сочетанием первичных и вторичных напряжений, по схемам Y/Y_n-0 , $Y/D-0$, $Y_n/Y_n/D-0-II$ и $Y_n/D/D-II-II$, а также позволяет учесть добавочные потери электроэнергии от циркуляции токов гармоник, кратных трем.

Целью настоящей работы является выполнение качественного и количественного учета магнитных потерь энергии в стали, намагничивающей реактивной мощности и энергии, вызванной полным гармоническим составом амплитуды тока холостого хода, а также мощности и энергии искажения при несинусоидальности магнитной индукции.

В работе предлагается метод, основанный на численном использовании намагничивающей мощности СТ, паспортных данных ($i_0, \%, P_{xx}, Bm, S_{ном}, кВА$), k_f – коэффициента формы кривой намагничивания [6] и условия постоянства намагничивающей мощности Q_x в СТ.

Известным методом определяем величины полной намагничивающей мощности $Q_x (ВА)$ и фазного тока холостого хода $I_{оф} (А)$.

Для оценки потерь в стали СТ напряжением от 6 до 110 кВ при несинусоидальной периодической индукции, имеющей за период один минимум и один максимум сделаны, следующие допущения.

1) Вводится понятие «эквивалентная частота» $f_э$ при отсутствии постоянной составляющей индукции $B_0 = 0,5 \cdot (B_{max} + B_{min})$. Это такая частота, при которой синусоидально меняющаяся индукция имеет такую же амплитуду, как и максимальная реальная индукция B_{max} .

2) Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату действующего напряжения $U_о^2$, индуктированного в обмотке.

Таким образом, используя вышеуказанные допущения, по известным паспортным данным СТ ($f_c Гц, P_{xx}, Bm$) при синусоидально изменяющейся индукции и частоте питающей сети $f_э = 50 Гц$, а

также $K_{\phi(u)}$ – коэффициенте формы кривой реального (не приведенного) напряжения, $K_{\phi, \text{син}}$ – коэффициенте формы для синусоидального напряжения и α – показателе степени, учитывающем зависимость потерь от частоты, предлагается формула расчета потерь в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{xx}} \cdot \left(\frac{K_{\phi(u)}}{1,11} \right)^{2(\alpha-1)}, \quad (5)$$

где $K_{\phi, \text{син}} = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$ по [4];

$\alpha = 1,56$ по [4];

$K_{\phi(u)}$ – коэффициент формы кривой реального напряжения определяется отношением:

$$K_{\phi(u)} = K_u \cdot K_{\phi, \text{син}}, \quad (6)$$

где K_u - коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения по ГОСТ 13109 при классах напряжения 6,10,35 и 110 кВ приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в относительных единицах

Нормально допустимое значение при $U_{\text{ном}}$, кВ			Предельно допустимое значение при $U_{\text{ном}}$, кВ		
6-10	35	110	6-10	35	110
1,17	1,15	1,13	1,20	1,18	1,14

Поэтому последовательность расчета потерь в стали при несинусоидальности индукции $P_{\text{ст}}$ формулы (5 и 6), активной и реактивной (основной, 1-й гармоники и с учетом всего гармонического спектра) составляющей тока холостого хода СТ (А), реактивной составляющей намагничивающей мощности СТ, вызванной основной, 1-й гармоникой и полным гармоническим составом тока холостого хода, мощности искажения (ВАр), а также остальные величины будет выполняться при нормально допустимом и предельно допустимом отклонениях синусоидальности кривой напряжения.

Величина активной составляющей тока холостого хода фазы СТ (А) определяется по соотношению:

$$I_{0\phi A} = \frac{P_{\text{ст}}}{m_1 \cdot U_{\phi}}. \quad (7)$$

Действующее значение основной гармоники реактивной составляющей намагничивающего тока, соответственно, (А):

$$I_{0\phi r} = \sqrt{I_{0\phi}^2 - I_{0\phi A}^2}. \quad (8)$$

Амплитудное значение реактивной составляющей несинусоидального намагничивающего тока (А) определяется по формуле:

$$i_{0\phi r} = I_{0\phi r} \cdot k_f, \quad (9)$$

где k_f – коэффициент кривой тока намагничивания по [6].

При изготовлении магнитных систем СТ применяются в основном рулонные тонколистовые анизотропные холоднокатанные электротехнические стали марок 3404-3408 толщиной 0,27; 0,30 и 0,35 мм, поэтому в соответствии с разъяснениями представленными в [6], для СТ с сердечниками, изготовленными из холоднокатанной стали, принимаем $k_f = 2,1$.

Величина реактивной намагничивающей мощности СТ (ВАр) от действия основной гармоники реактивного намагничивающего тока:

$$Q_{x.p} = \sqrt{Q_x^2 - P_{cm}^2}. \quad (10)$$

Величина реактивной намагничивающей мощности СТ (ВАр) от действия несинусоидального реактивного намагничивающего тока:

$$Q_{\mu} = m_1 \cdot U_{\phi} \cdot i_{0\phi r}. \quad (11)$$

Искомая величина мощности искажения в СТ (ВАр) [4]:

$$T = \sqrt{Q_{\mu}^2 - Q_{x.p}^2}. \quad (12)$$

Суточные потери энергии искажения в СТ (ВАр·ч):

$$\Delta W_T^{(T)} = T \cdot T_p, \quad (13)$$

где $T_p = 24ч$ – время работы оборудования на протяжении расчетного периода, в часах.

Величина затрачиваемой в течение суток потерь активной энергии в стали СТ (Вт·ч):

$$\Delta W_T^{(P)} = P_{cm} \cdot T_p. \quad (14)$$

Величина потерь активной энергии холостого хода в стали, включая потери энергии от несинусоидальности индукции (кВт·ч), выделяемые группой одинаковых по мощности СТ в течение года:

$$\Delta W_{год.групп}^{(P)} = \left(\frac{n \cdot \Delta W_T^{(P)} \cdot N}{10^3} \right), \quad (15)$$

где n – количество однотипных по мощности СТ, шт.;

$N = 365$ – количество дней в году.

Величина максимума магнитной реактивной энергии, выделяемая в магнитопроводе СТ (ВАр·ч) от действия основной гармоники намагничивающего тока в течение суток:

$$W_{макс24}^{(Q_{x.p.})} = Q_{x.p.} \cdot T_p. \quad (16)$$

Величина максимума магнитной реактивной энергии, выделяемая в магнитопроводе СТ (ВАр·ч) от действия несинусоидального намагничивающего тока в течение суток:

$$W_{макс24}^{(Q_{\mu})} = Q_{\mu} \cdot T_p. \quad (17)$$

Величина максимума реактивной магнитной энергии в магнитопроводе СТ, созданная основной гармоникой намагничивающего тока и выделяемая группой однотипных по мощности СТ в течение года (кВАр·ч):

$$\Delta W_{год.групп}^{(Q_{x.p.})} = \left(\frac{n \cdot \Delta W_{макс24}^{(Q_{x.p.})} \cdot N}{10^3} \right) \quad (18)$$

Величина максимума реактивной магнитной энергии в магнитопроводе СТ, созданная полным гармоническим составом тока холостого хода, выделяемая в группе одинаковых по мощности СТ в течение года (кВАр·ч):

$$\Delta W_{год.групп}^{(Q_{\mu})} = \left(\frac{n \cdot \Delta W_{макс24}^{(Q_{\mu})} \cdot N}{10^3} \right) \quad (19)$$

Ежегодная величина недоучтенной энергокомпаниями потери реактивной магнитной энергии в магнитопроводе СТ (кВАр·ч) определяется как разность:

$$\Delta W_{год.групп}^{(Q)} = \Delta W_{год.групп}^{(Q_{\mu})} - \Delta W_{год.групп}^{(Q_{x.p.})} \quad (20)$$

Величина потерь энергии искажения (кВАр·ч), выделяемая группой одинаковых по мощности СТ в течение года:

$$\Delta W_{год.групп}^{(T)} = \left(\frac{n \cdot \Delta W_T^{(T)} \cdot N}{10^3} \right) \quad (21)$$

Таким образом, формула для определения суммарных годовых потерь активной энергии в группе одинаковых по мощности СТ (кВт·ч) будет состоять из суммы активных потерь энергии от токов нагрузки в обмотках и стали этих трансформаторов с учетом несинусоидальности магнитной индукции и окончательно примет вид:

$$\begin{aligned} \sum W_{год.групп}^P &= \Delta W_{год.групп}^{(Pk.з.)} + \Delta W_{год.групп}^{(P)} = \\ &= \frac{n \cdot N}{10^3} \cdot [P_{K.з.} \cdot k_3^2 \cdot k_\phi^2 \cdot T_P + \Delta W_T^{(P)}] \end{aligned} \quad (22)$$

Аналогичным образом формула для определения суммарных годовых потерь реактивной энергии, выделяемой группой одинаковых по мощности СТ (кВАр·ч), будет состоять из суммы потерь реактивной энергии в обмотках вызванных током нагрузки и в стали этих трансформаторов с учетом всего спектра гармоник намагничивающего тока:

$$\begin{aligned} \sum W_{год.групп}^Q &= \Delta W_{год.групп}^{(Qк.з.)} + \Delta W_{год.групп}^{(Q\mu)} = \\ &= \frac{n \cdot N}{10^3} \cdot \left[S_n \cdot \frac{U_{к.з.}}{100} \cdot k_3^2 \cdot k_\phi^2 \cdot T_P + \Delta W_{макс24}^{(Q\mu)} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

В качестве примера были проведены расчеты потерь в стали магнитопровода при несинусоидальности индукции, намагничивающей мощности энергии, мощности искажения и энергии, выделяемой в СТ типа ТДТН-25000/110/35/10 кВ при следующих паспортных данных: $S_{ном} = 25000 \text{ кВА}$; номинальные напряжения обмоток: $U_{ВН} 110000 (\text{РПН} \pm 9 \times 1,78\% \text{ В})$; $U_{СН} 38500 (\text{ЛБВ} \pm 2 \times 2,5\% \text{ В})$; $U_{НН} 11000 \text{ В}$. Схема и группа соединения $Y / Y_0 / D - 0 - 11$. Параметры трансформатора: напряжение короткого замыкания обмоток: $U_{k(B-C)} = 10,5\%$; $U_{k(B-H)} = 17,5\%$; $U_{k(C-H)} = 6,5\%$. Потери короткого замыкания $P_k = 140000 \text{ Вт}$; потери холостого хода $P_{xx} = 31000 \text{ Вт}$; ток холостого хода $i_0 = 0,7\%$. Количество установленных СТ—2 шт.

Результаты исследований. Расчеты позволяют сделать вывод о том, что активная составляющая тока

холостого хода $I_{x.x.a.}\%$ и годичная величина потерь активной энергии в стали СТ, включая потери от несинусоидальности индукции, возрастают с увеличением ее искажения в 1,15-1,16 раза, в сравнении с величиной тока и потерями в стали этих же трансформаторов без учета потерь, вызванных несинусоидальностью индукции.

Аналогичным образом проведены расчеты по определению намагничивающей мощности, годичной величины потерь активной энергии в стали трансформаторов без учета несинусоидальности индукции и при учете несинусоидальности индукции в СТ напряжением 10(6)/0,4 кВ, 35/10(6) кВ, 110/10(6) кВ и 110/35/10(6) кВ распределительных электрических сетей Луганского региона [7], а также годичной величины энергии искажения, выделяемой этими СТ, сведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты расчета годичных потерь активной энергии в стали СТ-6/0,4 кВ, 10/0,4 кВ, 35/10(6) кВ, 110/10(6) кВ и 110/35/10 (6) кВ без учета несинусоидальности индукции

№ пп	Расчетные параметры	Расчеты без учета несинусоидальности индукции для СТ с сочетанием напряжения обмоток, кВ			
		6/0,4 кВ	10/0,4 кВ	35/10(6) кВ	110/10(6) кВ и 110/35/10(6)
1.	Суммарная номинальная мощность СТ $\sum S_{ном}, \text{кВА}$	1618238	1354130,50	2475060	6300900
2.	Годичные потери активной энергии в стали СТ $\Delta W_{год.групп}^{(P)}, \text{МВт} \cdot \text{час}$	46360,37	38120,15	33942,37	62959,00

Таблица 3

Результаты расчета годичных потерь активной энергии в стали СТ-6/0,4 кВ, 10/0,4 кВ, 35/10(6) кВ, 110/10(6) кВ и 110/35/10 (6) кВ при учете несинусоидальности индукции, максимальной реактивной энергии и энергии искажения, вызванных основной гармоникой и полным гармоническим спектром амплитуды тока холостого хода

№ пп	Расчетные параметры	Расчет при учете несинусоидальности индукции для СТ с сочетанием напряжений обмоток							
		6/0,4 кВ		10/0,4 кВ		35/10(6) кВ		110/10(6) кВ и 110/35/10(6)	
		$K_u = 1,17$	$K_u = 1,20$	$K_u = 1,17$	$K_u = 1,20$	$K_u = 1,15$	$K_u = 1,18$	$K_u = 1,13$	$K_u = 1,14$
1.	$\sum S_{ном}, \text{кВА}$	1618238		1354130,50		2475060		6300900	
2.	$\Delta W_{год.групп}^{(P)}, \text{МВт} \cdot \text{час}$	55273,26	56863,02	45448,83	46756,02	39693,90	40855,45	72194,76	72910,69
3.	$\Delta W_{год.групп}^{(Q_{x.p})}, \text{МВАр} \cdot \text{час}$	435986,72	435763,04	350843,88	350648,88	195547,26	195271,16	378826,71	378686,83
4.	$\Delta W_{год.групп}^{(Q_{\mu})}, \text{МВАр} \cdot \text{час}$	915572,11	915102,38	736772,15	736362,65	410649,24	410069,44	795536,09	795242,34
5.	$\Delta W_{год.групп}^{(T)}, \text{МВАр} \cdot \text{час}$	805101,15	804688,10	647874,81	647514,72	361101,19	360591,34	699548,43	699290,11
6.	$\Delta W_{год.групп}^{(Q)}, \text{МВАр} \cdot \text{час}$	479585,39	479339,34	385928,27	385713,77	215101,98	214798,28	416709,38	416555,51

Обобщающий анализ расчетов, проведенных по табл. 2 и 3, позволяет сделать заключения о том, что превышения величины годовых потерь активной энергии в стали СТ и активной составляющей тока холостого хода при учете несинусоидальности индукции над потерями без учета несинусоидальности индукции составляют:

-для СТ напряжением 10(6)/0,4 кВ при нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения – в 1,19 раза, при предельно допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения в 1,23 раза;

-для СТ напряжением 35/10(6) кВ при нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения – в 1,17 раза, при предельно допустимом искажении в – 1,20 раза;

-для СТ напряжением 110/10(6) кВ и 110/35/10(6) кВ при нормально допустимом искажении синусоидальности кривой напряжения – в 1,15 раза, при предельно допустимом искажении – в 1,16 раза.

Годичная величина максимума реактивной энергии, созданная полным спектром гармоник амплитуды тока холостого хода в двухобмоточных СТ напряжением 35/10(6) кВ, 110/10(6) кВ с группой соединения обмоток $Y/D-11$, а также в трехобмоточных СТ напряжением 110/35/10(6) кВ с группой соединения обмоток по схеме $Y_n/Y_n/D-0-11$ и $Y_n/D/D-11-11$, превышает годовую величину намагничивающей реактивной энергии, созданную основной гармоникой тока холостого хода, – в 2,1 раза и учитывает потери реактивной электроэнергии от замыкающегося во вторичной обмотке, соединенной в треугольник, циркуляционного тока, образованного гармониками кратными трем, который вследствие преобладания индуктивного сопротивления принимает практически индуктивный характер.

Кроме этого, годовая величина потерь энергии искажения в СТ с сочетанием напряжений 6/0,4 кВ, 10/0,4 кВ, 35/10(6) кВ, 110/10(6) кВ и 110/35/10(6) кВ превышает годовую величину намагничивающей реактивной энергии, созданную основной гармоникой тока холостого хода, в 1,85 раза при нормально допустимом и предельно допустимом искажениях напряжения в РЭС.

Выводы. 1. Предложена методика расчета, позволяющая определить потери активной энергии в стали СТ с сочетанием напряжений 6/0,4 кВ, 10/0,4 кВ, 35/10(6) кВ, 110/10(6) кВ и 110/35/10(6) кВ при учете потерь от несинусоидальности индукции, максимальную реактивную энергию магнитного поля, затрачиваемую на намагничивание СТ, созданную первой гармоникой реактивной составляющей тока холостого хода и полным спектром гармоник намагничивающего тока, энергию искажения, вызванной различием форм

гармонического состава у тока и напряжения, а также суммарные годовые потери активной и реактивной энергии, вызванные этими составляющими.

2. Для уменьшения потерь активной энергии в стали СТ, учитывая потери от несинусоидальности индукции, целесообразно при их изготовлении использовать сорта холоднокатаной, анизотропной электротехнической стали толщиной не менее 0,27 мм, с низким уровнем удельных потерь (0,85 Вт/кг при индукции 1,7 Тл) и коэффициентом формы кривой тока намагничивания, не превышающем $k_f = 1,6 \div 1,7$ [6].

3. Рекомендуется применять рекристаллизационный отжиг пластин трансформаторных сталей, который позволяет существенно снизить реактивную составляющую тока холостого хода и тем самым уменьшить потери энергии, затрачиваемой на намагничивание СТ, и энергии искажения в формах гармонического состава тока и напряжения.

4. Для существующих СТ в распределительных и магистральных электрических сетях необходима разработка методов подавления высших гармоник без внесения изменений в их конструкцию.

Л и т е р а т у р а

1. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-54:2011. Визначення технологичних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання.- К.: © Міненергуюглія, 2012.-56 с.;

2. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб.-Л.: Энергия, 1978. – 832 с.;

3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 582 с.;

4. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.–392 с.;

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В трех частях. Учебник для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. 4-е изд.,– М.: Высшая школа, 1964.-749 с.;

6. Артемьев Д.Е. Статистические основы выбора изоляции линий электропередачи высших классов напряжения/ Д.Е. Артемьев, Н.Н. Тиходеев, С.С. Шур.-М.-Л.: Энергия, 1965, 376 с.;

7. www.en.lg.ua/home/power дата обращения 27.02.2017 года.

R e f e r e n c e s

1. SOU-N ITS 40.1-37471933-54 2011. Determination of technological power consumption in transformers and power lines. - K.: Minenergouglya, 2012.–56 p.;

2. Voldek A.I. Electrical machines. Textbook for student's higher technically educational institute. 3-rd pub., rev. – L.: Energy, 1978. – 832 p.;

3. Tikhomirov P.M. Calculation of transformers: Textbook for high schools. 5 th edition, revised. And additional.– M: Energoatomizdat, 1986. – 582 p. ;

4. Leites L.V. Electromagnetic transformers and calculations reactors. - M.: Energy, 1981. – 392 p.

5. Bessonov L.A. Theoretical bases of electrical engineering. In three parts. A textbook for energy and electrical engineering universities and faculties. 4 th ed., – M.: Higher School, 1964. – 749 p.;

6. Artemyev D.E. Statistical Structures for Choosing Isolation of Power Transmission Lines of Higher Voltage Classes / D.E. Artemyev, N.N. Tikhodeev, S.S. Shur -M .: Energy, 1965. – 376 p.;

7. www.en.lg.ua/home/power дата обращения 27.02.2017 года.

Ivanov A.I., Petrov D.V., Sidorov O.S.

CALCULATION OF MAGNETIC LOSSES OF ENERGY IN STEEL OF POWER TRANSFORMERS WITH THE ACCOUNT OF NON-INVISIBILITY OF MAGNETIC INDUCTION

To determine the magnetic energy losses in the steel of power transformers (PTs), the magnetizing reactive power and the energy caused by the total harmonic composition of the idle current amplitude, and the power and energy of the distortion for non-sinusoidal magnetic induction, a method based on the numerical use of the magnetizing power PTs, the shape factor of the magnetization curve and the passport data of PTs.

The calculation of annual losses of active energy in the steel of magnetic cores PTs-10 (6)/0,4 kV, 35/10 (6) kV, 110/10 (6) kV and 110/35/10 (6) kV of distribution networks (DNES) of Lugansk Region and one-year maximum of the reactive energy expended on magnetization of these transformers under normal admissible and maximum allowable distortions of induction.

A number of measures are proposed to reduce the reactive component of the no-load current, the level of energy loss spent on magnetizing these PTs.

Key words: *three-phase power transformer, annual active energy losses in steel, annual maximum of reactive energy, annual energy losses of distortion, harmonic composition of no-load current.*

Иванов Анатолий Иванович, к.т.н. доцент кафедры «Электромеханика» ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Ivanov Anatoli Ivanovich, Candidate of Sciences, a dosent of the Chair «Electromechanics», State Educational Establishment of Higher Professional Education «Lugansk Vladimir Dahl National University».

E-mail: syrtsov.@lds.net.ua

Петров Дмитрий Васильевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедры «Электротехнические системы электропотребления» ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Petrov Dmitri Vasilevich, Candidate of Sciences, a dosent of the Chair «Electrotechnical Systems of Electroconsumption», State Educational Establishment of Higher Professional Education «Lugansk Vladimir Dahl National University».

E-mail: pdv-ese@mail.ru

Сидоров Олег Сергеевич, ассистент кафедры «Электротехнические системы электропотребления» ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Sidorov Oleg Sergeivich, a chair assistant of «Electrotechnical Systems of Electroconsumption», State Educational Establishment of Higher Professional Education «Lugansk Vladimir Dahl National University»

Рецензент: Яковенко Валерий Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электромеханика» ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля».

Статья подана 31.03.2017 года