

УДК 621.314

Г. В. Пуйло, д-р техн. наук,
Е. П. Насыпаная

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРОЕКТНЫЙ СИНТЕЗ ТРАНСФОРМАТОРОВ С КОМБИНАЦИЕЙ ОБМОТОК ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Предложена обобщенная математическая модель и методика оптимального проектного синтеза трансформаторов с комбинациями обмоток из различных проводниковых материалов. Обобщенная математическая модель инвариантна к числу концентрических обмоток трансформатора, виду проводниковых материалов, а ее компоненты представлены в виде полиномиальных функций. Это позволяет организовывать эффективную структурно-параметрическую оптимизацию трансформатора с обмотками из различных проводниковых материалов методом циклического покоординатного спуска.

Ключевые слова: распределительный трансформатор, слоистые обмотки, материал обмоточного провода, удельное сопротивление, удельная плотность, математическая модель, проектный синтез, проектные исследования

G. V. Puilo, ScD.,
E. P. Nasypanaya

OPTIMUM DESIGN SYNTHESIS OF TRANSFORMERS WITH THE COMBINATION WINDINGS FROM VARIOUS CONDUCTION MATERIALS

Abstract. The generalized mathematical model and technique of transformers optimum design synthesis with combinations of windings from various conduction materials was offered. The generalized mathematical model was adapted to the number of transformer windings circles, to a type of conduction materials, and its components were presented as the polynomials functions. It allows to organize effective structural and parametrical optimization of the transformer with windings from various conduction materials of the successive displacement method.

Keywords: distributive transformer, layered windings, material of winding wire, specific resistance, specific density, mathematical model, design synthesis, design researches

Г. В. Пуйло, д-р техн. наук,
О. П. Насыпана

ОПТИМАЛЬНИЙ ПРОЕКТНИЙ СИНТЕЗ ТРАНСФОРМАТОРІВ З КОМБІНАЦІЄЮ ОБМОТОК З РІЗНИХ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Запропоновано узагальнену математичну модель і методику оптимального проектного синтезу трансформаторів з комбінаціями обмоток з різних провідникових матеріалів. Узагальнена математична модель є інваріантною до кількості концентричних обмоток трансформатора, виду провідникових матеріалів, а її компоненти представлені у вигляді поліноміальних функцій. Це дозволяє організовувати ефективну структурно-параметричну оптимізацію трансформатора з обмотками з різних провідникових матеріалів методом циклічного покоординатного спуску.

Ключові слова: розподільчий трансформатор, шарові обмотки, матеріал обмоткового проводу, питомий опір, питома густина, математична модель, проектний синтез, проектні дослідження

Введение. Свойства проводникового материала обмоток оказывают существенное влияние на технико-экономические параметры силовых трансформаторов: на геометрическую соразмерность (соотношение геометрических размеров обмоток и магнитной системы (МС)), на расход активных материалов, на уровень основных и добавочных потерь, нагрузочную способность, динамическую устойчивость и другие показатели. Выбор типа материала обмоточного про-

лиза технических требований к трансформатору с учетом экономических условий и технологических возможностей производителя. В современном трансформаторостроении получили применение обмоточные провода двух видов электротехнических материалов – меди (Cu) и алюминия (Al), а для наиболее энергоэффективных трансформаторов расширяется применение проводов с высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП) [1, 2].

Постановка задачи исследования. Как правило, в серийных силовых трансформаторах не используется сочетание обмоток из различных проводниковых материалов. Их об-

© Пуйло Г.В., Насыпаная Е.П., 2014

вода при проектировании конкретного типа трансформатора выполняется на основе ана-

мотки выполняются либо из медного (трансформаторы с мощностью более 10000 кВ·А), либо алюминиевого (трансформаторы с мощностью менее 10000 кВ·А) провода [3, 4].

Однако в ряде случаев из экономических соображений в специальных трансформаторах оказывается целесообразным использование, по крайней мере двух разных видов проводов – медного и алюминиевого [5]. Поэтому при решении задач структурно-параметрической оптимизации обмоток силового трансформатора необходимо рассматривать возможность выполнения совокупности обмоток не только из обмоточного провода с одинаковым материалом, но и сочетаний обмоток из различных проводниковых материалов. В этой проектной ситуации необходимо решение задач оптимального размещения концентроров обмоток из различных материалов в окне трансформатора, обеспечения оптимального уровня плотностей токов в концентраторах при минимизации их числа и допустимом уровне тепловой нагрузки, удовлетворении заданного значения напряжения короткого замыкания.

Для возможности выполнения обобщенного анализа при рациональном уровне размерности решаемых задач целесообразно использовать замену совокупности реальных обмоток эквивалентной обмоткой. Конструктивное исполнение обмоток цилиндрическое слоевое. Мощность эквивалентной обмотки S_3 принимается равной сумме типовых мощностей реальных обмоток. Эквивалентная обмотка создает ту же арифметическую сумму намагничивающих сил, потерь и имеет ту же массу, что и сумма реальных обмоток [6].

Из этих условий следует, что при числе реальных обмоток n

$$S_3 = \sum_{i=1}^n S_i \text{ или } I_3 w_3 = \sum_{i=1}^n I_i w_i, \quad (1)$$

где I_3 , w_3 , I_i , w_i – соответственно номинальные токи и числа витков эквивалентной и i -й обмоток.

Введем обозначения:

$$C_{11} = \frac{S_1}{S_1} = \frac{I_1 w_1}{I_1 w_1}, \quad C_{21} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{I_2 w_2}{I_1 w_1}, \quad C_{i1} = \frac{S_i}{S_1} = \frac{I_i w_i}{I_1 w_1},$$

где S_1 , S_2 , S_i – типовые мощности первой (самой близкой к стержню) и i -й обмоток; C_{11} , C_{21} , C_{i1} – относительные коэффициенты приведения мощностей обмоток к мощности первой обмотки. Тогда

$$I_3 w_3 = \sum_{i=1}^n I_i w_i = I_1 w_1 \sum_{i=1}^n C_{i1} = I_1 w_1 l_{c1}, \quad (2)$$

где $l_{c1} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i w_i}{I_1 w_1} = \sum_{i=1}^n C_{i1}$ – обобщенный коэффициент суммы относительных мощностей реальных обмоток.

Из (2) следует, что

$$I_1 w_1 l_{c1} = j_3 s_3 w_3, \quad (3)$$

где j_3 , s_3 , w_3 – расчетная плотность тока, площадь поперечного сечения витка и число витков эквивалентной обмотки.

Суммарную площадь поперечного сечения витков реальных обмоток в "окне" трансформатора $s_3 w_3$ также можно выразить через относительные мощности реальных обмоток, так как $s_i = I_i / j_i$:

$$s_3 w_3 = \sum_{i=1}^n s_i w_i = s_1 w_1 \sum_{i=1}^n \frac{I_i w_i}{I_1 w_1} \frac{j_1}{j_i}, \quad (4)$$

где j_1 , j_i – плотности токов первой и i -й обмоток.

Обозначив отношение этих плотностей как $k_{i1} = j_i / j_1$, получим

$$s_3 w_3 = s_1 w_1 \sum_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}} = s_1 w_1 l_{n1}, \quad (5)$$

где $l_{n1} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}}$ – коэффициент приведения параметров i -х обмоток ($i=1...n$) к параметрам первой обмотки с учетом отношений их плотностей токов.

Из (3) и (5) следует, что

$$s_3 w_3 j_3 = s_1 w_1 j_1 l_{c1} = s_1 w_1 j_3 l_{n1}, \text{ т.е.}$$

$$j_3 = j_1 \frac{l_{c1}}{l_{n1}}. \quad (6)$$

Аналогично можно выразить зависимость j_3 от коэффициентов приведения параметров обмоток, если приведение выполнить не к первой, а к параметрам любой (j -й) обмотки. В этом случае

$$j_3 = j_j \frac{l_{cj}}{l_{nj}}, \quad (7)$$

где j_j – плотность тока j -й обмотки (обмотки приведения); $l_{cj} = \sum_{i=1}^n C_{ij}$, $l_{nj} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ij}}{k_{ij}}$.

Так как класс нагревостойкости изоляции всех концентроров реальных обмоток в «окне» одинаков, то их средние удельные тепловые нагрузки ($q_{o1}, q_{o2}, \dots, q_{on}$) и тепловая нагрузка эквивалентной обмотки $q_{o\varnothing}$ должны быть одинаковыми, т. е.

$$q_{o1} = q_{o2} = \dots = q_{oi} \dots = q_{on} = q_{o\varnothing}. \quad (8)$$

Выразим эти тепловые нагрузки через потери в обмотках и их поверхности охлаждения

$$q_{o1} = \frac{P_{\kappa 1}}{S_1^{oxl}} = \frac{P_{\kappa 2}}{S_2^{oxl}} = \dots = \frac{P_{\kappa n}}{S_n^{oxl}} = \frac{P_{\kappa \varnothing}}{S_{\varnothing}^{oxl}}, \quad (9)$$

где $P_{\kappa 1}, P_{\kappa 2}, \dots, P_{\kappa n}$ – основные потери в обмотках 1, 2, ..., n; $P_{\kappa \varnothing}$ – полные потери в эквивалентной обмотке; $S_1^{oxl}, S_2^{oxl}, \dots, S_n^{oxl}$ – площадь эффективной поверхности охлаждения 1, 2, ..., n обмоток; S_{\varnothing}^{oxl} – площадь эффективной поверхности охлаждения эквивалентной обмотки.

Для любой (i -й) обмотки основные потери

$$P_{\kappa i} = \frac{\rho_i}{\gamma_i} j_i^2 G_{\kappa i} = \frac{\rho_i}{\gamma_i} j_i^2 n_{cm} \gamma_i s_i w_i L_{\varrho i}, \quad (10)$$

где ρ_i – удельное электрическое сопротивление проводникового материала i -й обмотки; γ_i – плотность проводникового материала i -ой обмотки; $G_{\kappa i}$ – масса провода i -ой обмотки; $L_{\varrho i}$ – средняя длина витка i -й обмотки; n_{cm} – число стержней МС трансформатора.

Поверхность охлаждения i -й цилиндрической слоевой обмотки

$$S_i^{oxl} = 2n_{\kappa i} K_{oi} H_{oi} L_{\varrho i}, \quad (11)$$

где $n_{\kappa i}$ – количество концентроров i -й обмотки с двумя вертикальными поверхностями охлаждения; K_{oi} – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности охлаждения i -й обмотки; H_{oi} – высота i -й обмотки.

Для эквивалентной обмотки

$$q_{o\varnothing} = \frac{\rho_{\varnothing} j_{\varnothing}^2 L_{\varrho \varnothing} s_{\varnothing} w_{\varnothing}}{2n_{\kappa \varnothing} K_{o\varnothing} H_{o\varnothing} L_{\varrho \varnothing}}, \quad (12)$$

где $L_{\varrho \varnothing}$ – средняя длина витка эквивалентной обмотки; $K_{o\varnothing}$ – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности охлаждения эквивалентной обмотки; $n_{\kappa \varnothing} = n \cdot n_{\kappa i}$ – суммарное

число вертикальных поверхностей охлаждения концентроров реальных обмоток трансформатора; n – число обмоток.

При обобщенном анализе можно принять, что

$$H_{o1} = H_{o2} = \dots = H_{on} = H_{o\varnothing} = H_o,$$

$$K_{o1} = K_{o2} = \dots = K_{on} = K_{o\varnothing},$$

$$n_{\kappa 1} = n_{\kappa 2} = \dots = n_{\kappa i} = n_{\kappa n}.$$

При выполнении обмоток из различного проводникового материала

$$\rho_1 \neq \rho_2 \neq \dots \neq \rho_n \neq \rho_{\varnothing},$$

где ρ_{\varnothing} – условное удельное электрическое сопротивление материала провода эквивалентной обмотки.

Из (8) следует, что для любой пары обмоток

$$q_{o1} = q_{oi} = \frac{\rho_1 j_1^2 L_{\varrho 1} s_1 w_1}{2n_{\kappa 1} K_{o1} H_{o1} L_{\varrho 1}} = \frac{\rho_i j_i^2 L_{\varrho i} s_i w_i}{2n_{\kappa i} K_{oi} H_{oi} L_{\varrho i}},$$

$$\frac{j_i^2}{j_1^2} = \frac{\rho_1 s_1 w_1}{\rho_i s_i w_i}, \quad \frac{j_i}{j_1} = \frac{1}{C_{i1}} \frac{\rho_1}{\rho_i},$$

$$\frac{s_1 w_1}{s_{\varnothing} w_{\varnothing}} = \frac{1}{l_{n1}} \quad \text{или} \quad \frac{s_1 w_1}{s_{\varnothing} w_{\varnothing}} = \frac{j_{\varnothing}}{j_1} \frac{1}{l_{c1}}. \quad (13)$$

Таким образом, при выполнении обмоток из различного материала и условия (8) следует, что отношение плотностей токов, например, i -й и 1-й обмоток необходимо выбрать по соотношению (13), то есть

$$k_{i1} = \frac{j_i}{j_1} = \frac{1}{C_{i1}} \frac{\rho_1}{\rho_i}. \quad (14)$$

Тогда коэффициенты l_{n1} и l_{nj} выразятся так:

$$l_{n1} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i1}}{k_{i1}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho_1} C_{i1}^2, \quad (15)$$

$$l_{nj} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ij}}{k_{ij}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho_j} C_{ij}^2. \quad (16)$$

Из (9) и (12) для первой и эквивалентной обмоток также следует

$$\frac{\rho_{\varnothing} j_{\varnothing}^2 s_{\varnothing} w_{\varnothing}}{n_{\kappa \varnothing} K_{o\varnothing}} = \frac{\rho_1 j_1^2 s_1 w_1}{n_{\kappa 1} K_{o1}} \quad \text{или}$$

$$\frac{j_{\varnothing}^2}{j_1^2} = \frac{\rho_1 s_1 w_1 n_{\kappa \varnothing}}{\rho_{\varnothing} s_{\varnothing} w_{\varnothing} n_{\kappa 1}} = \frac{\rho_1}{\rho_{\varnothing}} n \frac{1}{l_{n1}}, \quad \text{либо}$$

$$\frac{j_{\varnothing}^2}{j_1^2} = \frac{\rho_1}{\rho_{\varnothing}} n \frac{j_{\varnothing}}{j_1} \frac{1}{l_{c1}}, \quad \frac{j_{\varnothing}}{j_1} = \frac{\rho_1}{\rho_{\varnothing}} n \frac{1}{l_{c1}}. \quad (17)$$

Индукция в стержне B , Тл	1,6	1,56
Отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода ξ , о.е.	4,5	4,75
Отношение стоимостей обмоток к стоимости МС x , о.е.	0,61	0,49
Напряжение короткого замыкания U_k , %	4,42	4,8
Масса МС $G_{МС}$, кг	794	852
Масса обмоток $G_{обм}$, кг	180	155
Потери холостого хода $P_{хх}$, Вт	1030	1044
Потери короткого замыкания $P_{кз}$, Вт	4388	5123
Капитализированные затраты Z_k , грн	164800	179700

Выводы. Полученные результаты выполненных исследований позволяет сформулировать следующие выводы.

Для оптимизированного варианта трансформатора ТМ400/10 с обмоткой НН, выполненной из алюминиевого провода, и медной обмоткой ВН полученные значения потерь холостого хода и короткого замыкания отличаются от номинальных значений на 24 % и 20 % соответственно, а для трансформатора ТМ400/10 с медно-алюминиевыми обмотками – на 26 % и 7 %, что соответствует требованиям ГОСТ 11677-85 [5].

У оптимального варианта трансформатора с алюминиево-медными обмотками, в сравнении с оптимальным вариантом трансформатора с медно-алюминиевыми обмотками, суммарные потери уменьшаются на 13 %, капитализированные затраты на 8 % при увеличении суммарной массы масса активных материалов 13 %.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что более целесообразным является создание алюминиево-медных распределительных трансформаторов. Это позволяет уменьшить массу стали на 7 % и потери в ней на 1,5 % при увеличении массы обмоток на 13 % и уменьшении в них потерь на 14 % по сравнению с медно-алюминиевыми вариантом.

Таким образом, предложенная методика проектного синтеза трансформаторов позволяет выполнять не только оптимизацию параметров концентров обмоток, но и оптимизацию их взаимного размещения в окне на основе свойств и стоимости их проводниковых материалов.

Список использованной литературы

1. Chen X., and Jianxun J., (2007), Devel-

opment and Technology of HTS Transformers, *Journal of Research Communication Publ.*, Vol. 1, pp. 6 – 7.

2. Wang Y., Zhao X., and Han J., (2009), Development and Test in Grid of 630 kV·A Three-Phase High-Temperature Superconducting Trans Former, *Journal of Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China Publ.*, Vol. 4 (1), pp. 104 – 113.

3. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга / С. Д. Лизунов, А. К. Лоханин. – М. : Энергоиздат. – 2004. – 616 с.

4. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров – М. : Энергия. – 1986. – 526 с.

5. Трансформаторы силовые типа ТМ 25-1000 кВ·А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Обухов, ЗАО «Эрго». – 2007. – 30 с.

6. Пуйло Г. В. Обобщенная математическая модель для синтеза и анализа силовых трансформаторов со слоевыми обмотками [Текст] / Г.В. Пуйло, Е. В. Трищенко // *Электротехника і Електромеханіка*. – Харьков : – 2005. – № 2. – С. 42 – 45.

7. Пуйло Г. В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками [Текст] / Г. В. Пуйло, Д. М. Левин, Е. В. Трищенко // *Электротехніка і Електромеханіка*. – Харьков : – 2004. – № 1. – С. 49 – 52.

8. Пуйло Г. В. Автоматизированный проектный синтез силовых трансформаторов / Г. В. Пуйло, И. С. Кузьменко, Е. П. Насыпаная. – Одесса : ОНПУ. – 2009. – 153 с.

9. Corhodzic S., and Kalam A., (2000), Assessment of Distribution Transformers using Loss Capitalization Formulae, *Journal of Electrical and Electronics Engineering Publ.*, Vol. 1., pp. 43 – 48.

10. ABB Green Distribution Transformer Program. Partnership for a Sustainable Environment, (2010), *ABB Ltd. Publ.*, pp.1 – 6, Available at: www.abb.com/transformers.

Получено 02.06.2014

References

1. Chen X., Jianxun J. Development and Technology of HTS Transformers, (2007), *Journal of Research Communication Publ.*, Vol. 1, pp. 6 – 7.

2. Wang Y., Zhao X., and Han J., (2009), Development and Test in Grid of 630 kV·A Three-Phase High-Temperature Superconducting Transformer, *Journal of Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China Publ.*, Vol. 4(1), pp. 104 – 113.

3. Lizunov S.D., and Lokhanin A.K. Silovye transformatory. Spravochnya kniga [Power Transformers. Handbook], (2004), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat Publ.*, 616 p. (In Russian).

4. Tishomirov P. M. Raschet transformatorov [The Transformers Calculation], (1986), Moscow, Russian Federation, *Energy Publ.*, 526 p. (In Russian).

5. Transformatory silovye tipa TM 25-1000 кVA. Tekhnicheskoe opisanie i instrukcyia po ekspluatatsii [Power Transformers Type TO 25-1000 кV·A. Technical Specification and Maintenance Instruction], (2007), Obuchov, Ukraine, 30 p. (In Russian).

6. Puilo G.V., and Trishenco E.V. Obobshchennaya matematicheskaya model' dlya sinteza i analiza transformatorov so sloevymi obmotkami [The Generalized Mathematical Model for Synthesis and the Analysis of Power Transformers with Layered Windings], (2005), *Elektrotehnika i Elektromekhanika Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 2, pp.42 – 45 (In Russian).

7. Puilo G.V., Levin D.M., and Trishenco E.V. Podsystema avtomatizirovannogo sinteza silovykh transformatorov so sloevymi obmotkami [Subsystem of the Power Transformers with Layered Windings Automated Synthesis], (2004) *Elektrotehnika i Elektromekhanika Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 2, pp. 42 – 45 (In Russian).

8. Puilo G.V., Kuzmenko I.C., and Nasypanaya E.P. Avtomatizirovanny proektny sintez silovykh transformatorov [The Automated Design Synthesis of Power Transformers], (2009), Odessa, Ukraine, *ONPU Publ.*, 153 p. (In Russian).

9. Corhodzic S., and Kalam A., (2000), Assessment of Distribution Transformers using Loss Capitalization Formulae, *Journal of Electrical and Electronics Engineering Publ.*, Vol. 1, pp. 43 – 48.

10. ABB Green Distribution Transformer Program. Partnership for a Sustainable Environment, (2010), *ABB Ltd. Publ.*, pp.1 – 6, Available at: www.abb.com/transformers.



Пуйло
Глеб Васильевич,
д-р техн. наук, проф.
каф. электрических
машин Одесского нац.
политехн. ун-та,
тел. (+38048) 734-8479,
e-mail: puilo@ukr.net



Насыпаная
Елена Петровна,
аспирантка каф.
электрических машин
Одесского нац.
политехн. ун-та,
e-mail:
nasypanaya_elena@mail.ru
и