

УДК 621.314

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

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований силовых трансформаторов, способами повышения энергоэффективности которых является применение таких инновационных технических решений, как: использование новых марок электротехнических сталей, современных проводниковых материалов и оптимизация параметров преобразуемой электрической энергии. Для проектного синтеза трансформаторов использовался комплекс математических моделей, позволяющий учитывать свойства новых электротехнических материалов, изменение частоты и конструктивные особенности трансформаторов.

Показано, что наибольшая энергоэффективность у трансформаторов с повышенной рабочей частотой, сверхпроводниковыми обмотками и магнитной системой из аморфной стали.

Ключевые слова: силовой трансформатор, цилиндрические обмотки, электротехническая сталь, аморфные сплавы, высокотемпературный сверхпроводник, частота, потери, капитализированная стоимость, оптимизация, проектные исследования, ресурсоэффективность, энергоэффективность.

Puilo G. V., Dr. of tekhn. sciences,
Nasypanaya E. P., PhD

ENERGY EFFECTIVE POWER TRANSFORMERS

Abstract. The results of power transformers calculation research which ways of energy efficiency increase is application of such innovative technical solutions as using of new electrotechnical steel brands, modern conduction materials and optimization of the transformed electric energy parameters. The complex of mathematical models was used for design synthesis of transformers, which allows to consider properties of new electrotechnical materials, frequency change and design features of transformers.

It is shown that the transformers with high working frequency, superconductor windings and the magnetic system from amorphous steel have become the greatest energy efficiency.

Keywords: power transformer, cylindrical windings, electrotechnical steel, amorphous alloys, high-temperature superconductivity, frequency, losses, capitalized cost, optimization, design researches, resources and energy efficiency.

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

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Анотація. Представлені результати розрахункових досліджень силових трансформаторів, способами підвищення енергоефективності яких є застосування таких інноваційних технічних рішень, як: використання нових марок електротехнічних сталей, сучасних провідникових матеріалів і оптимізація параметрів перетвореної електричної енергії. Для проектного синтезу трансформаторів використовувався комплекс математичних моделей, який дозволяє враховувати властивості нових електротехнічних матеріалів, зміну частоти і конструктивні особливості трансформаторів.

Показано, що найбільша енергоефективність у трансформаторів з підвищеною робочою частотою, надпровідниковими обмотками і магнітною системою з аморфної сталі.

Ключові слова: силовий трансформатор, шарові обмотки, електротехнічна сталь, аморфні сплави, високотемпературна надпровідність, частота, втрати, капіталізована вартість, оптимізація, проектні дослідження, ресурсоефективність, енергоефективність.

Введение. Силовые трансформаторы мощностью до 1000 кВ·А напряжением 6-10 кВ – это наиболее распространенные силовые трансформаторы в энергетических системах не только Украины, но и других стран. Общие потери электрической энергии энергетических систем Украины составляют

около 20% от всей произведенной электроэнергии. Около 40% этих потерь составляют потери в распределительных трансформаторах. Ежегодные затраты на обслуживание одного распределительного трансформатора класса напряжения 6-10 кВ составляют около 8% от его первоначальной стоимости.

Поэтому в последние годы заметно выросла потребность в высококачественном, надежном и безопасном электрооборудовании, соответствующем мировым стандартам. Эту проблему можно решить путем внедрения современных технологий и технических решений, предусматривающих использование новых электротехнических материалов, обеспечивающих ряд экономических и экологических преимуществ, таких как снижение массы, уменьшение габаритов, повышение мощности, сокращение потерь энергии и высокий уровень безопасности [1,2,3].

Наиболее перспективными средствами совершенствования трансформаторного оборудования массовых серий, позволяющими существенно повысить их энерго- и ресурсоэффективность являются следующие [4-10]:

- использование новых марок электротехнических сталей (ЭТС) с существенно пониженными потерями при достаточно высоком уровне рабочей индукции;

- применение новых видов электроизоляционных материалов с повышенной термостойкостью и сроком эксплуатации для обмоточных проводов и деталей главной изоляции;

- использование для обмоток трансформаторов проводниковых материалов (ПМ) с высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП);

- применение новых типов пожаробезопасных жидких диэлектриков, заменяющих минеральное масло в системах охлаждения трансформаторов;

- применение новых конструктивных и технических решений;

- оптимизация параметров преобразуемой электрической энергии (величины рабочей частоты, уровня напряжения).

Внедрение многих из перечисленных и других существующих инновационных разработок требует существенного изменения традиционных технологических процессов в трансформаторостроении и значительных ресурсных и финансовых затрат. Поэтому необходим детальный, с учетом технико-экономических факторов, анализ целесообразности первоочередного использования некоторых из наиболее эффективных инно-

вационных достижений, таких как: применение новых видов ЭТС, обмоточных проводов и оптимизация рабочей частоты силовых трансформаторов.

Постановка задачи исследования. Целью настоящей работы является исследование ряда новых указанных технических решений, позволяющих повысить ресурсо- и энергоэффективность силовых трансформаторов.

Для этого выполнен комплекс расчетных проектных исследований трехфазных силовых трансформаторов класса напряжения 6-10 кВ в диапазоне мощностей 63-630 кВА. При решении задач оптимального проектирования и проектных исследований использовался комплекс разработанных математических моделей, позволяющий учитывать электромагнитные свойства ЭТС при различных рабочих частотах, характеристики проводниковых материалов, а также особенности конструкции МС и обмоток. В качестве критерия оптимизации выбран экономический критерий – полная капитализированная стоимость S_k .

Материалы исследований. Исследования изменений массо-стоимостных показателей силовых трансформаторов представлены на примере трансформатора ТМ400/10, МС которого изготовлены из различных ЭТС, а обмотки – из различных ПМ, при изменении уровня рабочей частоты в диапазоне 50-500 Гц. В качестве основного конструктивного исполнения МС принята наиболее технологичная планарная стержневая конструкция МС, а обмотки выполнены цилиндрическими слоевыми.

В качестве базовой единицы приняты технико-экономические параметры оптимального варианта трансформатора ТМ400/10 с плоской шихтованной МС, изготовленной из ЭТС марки 3407 толщиной 0,35 мм, цилиндрическими слоевыми обмотками из алюминиевого провода марки АПБ и рабочей частотой 50 Гц.

Результаты исследований влияния новых электротехнических материалов и рабочей частоты на параметры трансформаторов, МС которых изготовлены из ЭТС с ориентированным зерном марки М120-23S толщиной 0,23 мм и аморфных сплавов (АС) марки

2НСР толщиной 0,025 мм, а обмотки из алюминиевого, медного и ВТСП (Bi2223) провода, представлены на рисунках 1, 2 и в таблице 1.

изготовления обмоток позволяет уменьшить величину g_y в 2 раза, повышение частоты – в 2,5 раза.

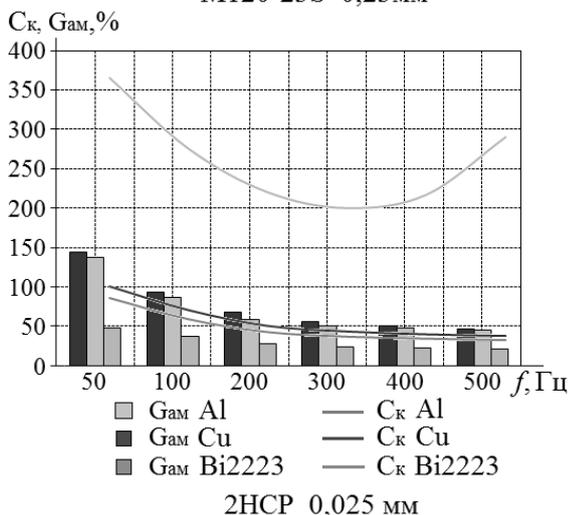
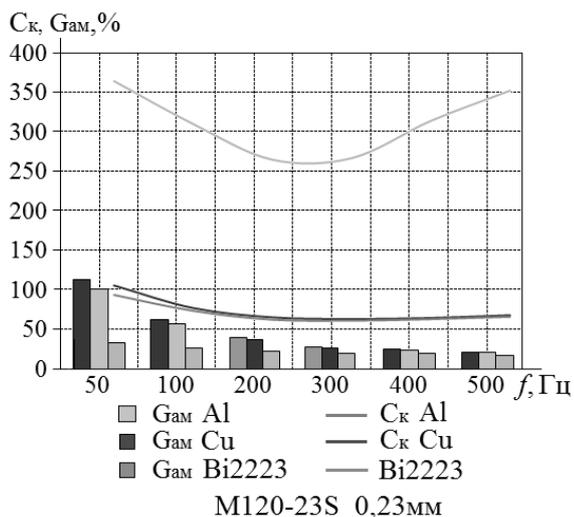


Рис. 1. Относительные значения C_k и масс активных материалов ($G_{ам}$) оптимальных вариантов трансформаторов 400/10 с МС из различных ЭТС (М120-23S, 2НСР) и обмотками из различных ПМ (Al, Cu, Bi2223) при изменении рабочей частоты.

Полученные зависимости позволяют сделать выводы о том, что в силовых трансформаторах с МС из улучшенной ЭТС и обмотками из традиционных ПМ при увеличении мощности в 10 раз и неизменной частоте величина удельной массы активных материалов g_y уменьшается в среднем в 2,5 раза, а при десятикратном увеличении частоты величина g_y может быть уменьшена в 3-5 раз. Применение ВТСП проводов для

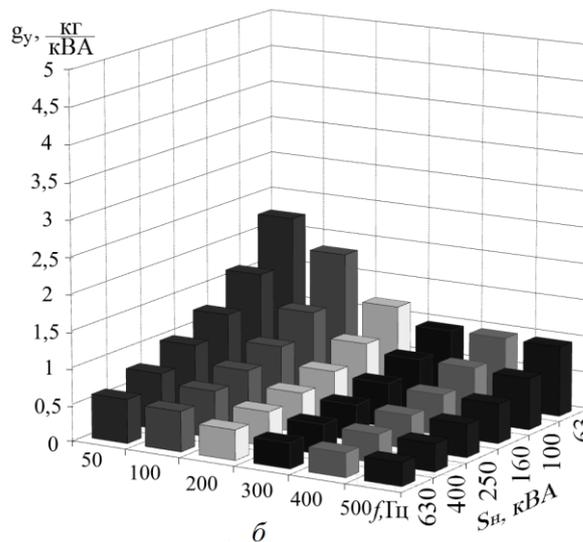
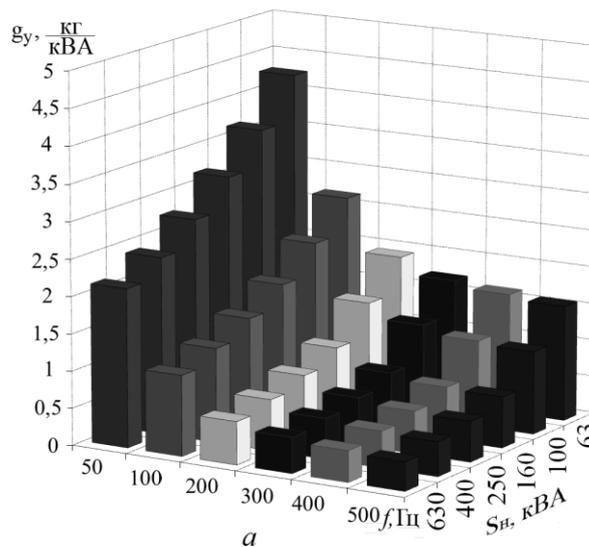


Рис. 2. Зависимости g_y силовых трансформаторов с алюминиевыми (а) и ВТСП (б) обмотками от рабочей частоты и номинальной мощности.

Выводы. Анализ результатов выполненных исследований позволяет сформулировать следующие выводы:

- применение более совершенных ЭТС (М120-23S) для МС трансформаторов с обмотками из традиционных ПМ и рабочей частотой 50 Гц обеспечивает снижение суммарных потерь в трансформаторе на 10 %, полной капитализированной стоимости на 5%, при такой же массе активных материалов. Причем, чем лучше свойства ЭТС, тем

выше оптимальная рабочая частота. Для данной ЭТС оптимальным является диапазон частот 200-300 Гц. У оптимального варианта трансформатора с частотой 300 Гц суммарные потери снижены на 28%, суммарная масса активных материалов на 75%, а стоимость на 38% по сравнению с базовым;

– применение ЭТС из аморфных сплавов для МС трансформаторов с обмотками из традиционных ПМ и рабочей частотой 50 Гц позволяет снизить величину суммарных потерь на 32%, полной капитализированной стоимости 13%, однако приводит к увеличению суммарной массы активных материалов на 40 % по сравнению с базовым вариантом. Оптимальной же является частота, превы-

шающая 500 Гц. Однако при рабочей частоте, равной 500 Гц суммарные потери уменьшаются на 70%, суммарная масса активных материалов на 54%, а стоимость на 67% по сравнению с базовым. Таким образом, с учетом экономической эффективности, для изготовления МС трансформаторов, работающих на частоте 500 Гц и выше, целесообразно применять ЭТС из аморфных сплавов, позволяющих значительно уменьшить габариты МС и стоимость трансформатора;

– применение для обмоток ВТСП проводов и улучшенной ЭТС при промышленной частоте 50 Гц позволяет снизить суммарные потери на 94 %, массу активных материалов на 66 %, однако увеличивает пол-

Таблица 1. Основные технико-экономические параметры оптимальных вариантов трансформаторов мощностью 400 кВА с МС из различных ЭТС и обмотками из различных ПМ при оптимальных рабочих частотах

Показатель	Условные обозначения	Базовый вариант	Параметры					
			М120-23S толщина 0,23 мм			2НСР толщина 0,025 мм		
Материал МС	ЭТС	3407 0,35 мм	300	350	300	500	500	350
Оптимальная частота, Гц	f	50	300	350	300	500	500	350
ПМ	—	Al	Al	Cu	ВТСП	Al	Cu	ВТСП
Масса МС, кг	$G_{мс}$	722	183	156	145	366	346	195
Масса обмоток, кг	$G_{обм}$	194	48	61	20	57	86	25
Масса активных материалов, кг	$G_{ам}$	916	231	217	165	423	432	220
Потери холостого хода, Вт	P_o	0,86	1,4	1273	1009	261	260	166
Потери короткого замыкания, Вт	P_k	4075	2130	2110	79	1200	1210	58
Сума потерь, Вт	$\sum P$	4933	3546	3383	1088	1461	1470	224
Стоимость активных материалов, тыс. грн.	$C_{ам}$	51	14	16	93	22	28	107
Полная капитализированная стоимость, тыс. грн.	C_k	163,5	101	106	446	54	62	345
Размеры активной части								
Диаметр стержня, мм	$D_{ст}$	189	109	115	125	159	167	138
Межосевое расстояние, мм	MO	387	239	225	184	284	286	194
Ширина обмоток, мм	T_m	377	229	216	174	274	276	184
Высота МС, мм	H_m	1044	758	618	471	748	689	555
Габаритный объем активной части, м ³	V_m	0,45	0,12	0,09	0,044	0,17	0,16	0,058

ную капитализированную стоимость в 3 раза. Оптимальной является частота 300 Гц,

при которой суммарные потери в трансформаторе уменьшаются на 78 %, расход

активных материалов на 82 %, но увеличивается полная капитализированная стоимость в 2,46 раза;

– применение ВТСП обмоток и АС в трансформаторах при промышленной частоте 50 Гц позволяет снизить суммарные потери на 98 %, массу активных материалов на 51 %, но приводит к увеличению стоимости в 3,2 раза. Частота 350 Гц является оптимальной по критерию C_k для данной ЭТС. При повышенной частоте 350 Гц суммарные потери в трансформаторе снижаются на 96 %, расход активных материалов на 77 %, однако стоимость увеличивается в 1,9 раза.

У всех полученных оптимальных вариантов трансформаторов с ВТСП обмотками наблюдается рост стоимости в 2-3 раза, что является особенностью данного технического решения. Такое увеличение полной капитализированной стоимости связано прежде всего с высокой стоимостью криогенных установок, однако влияние этого фактора может быть снижено с ростом объемов их производства.

Таким образом, результаты проектных исследований обуславливают вывод о том, что наиболее целесообразным для повышения энерго- и ресурсоэффективности энергетических систем является создание и внедрение трансформаторов с МС из современных (прежде всего аморфных) ЭТС с ВТСП обмотками в диапазоне рабочих частот 250-350 Гц. Для автономных энергосистем наземных, водных и подводных транспортных средств нет иной альтернативы существенного совершенствования электрооборудования, кроме повышения рабочей частоты.

Список использованной литературы

1. Інноваційні пріоритети паливно-енергетичного комплексу України. – Київ: Українські енциклопедичні знання. – 2005. – 512 с.

2. Пуйло, Г.В. Современные тенденции совершенствования силовых трансформаторов / Г.В. Пуйло, И.С.Кузьменко, В.В.Тонгалюк // *Электротехника та Електромеханіка*. – Х.: 2008. – №2. – С. 48 – 52.

3. Силовые трансформаторы: справоч. кн. / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

4. Пуйло, Г.В. Эффективность применения обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью в силовых трансформаторах / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпана // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2014. – №14(90). – С.43-52.

5. Насыпаная, Е.П. Перспективы повышения ресурсо- и энергоэффективности силовых трансформаторов / Е.П. Насыпаная, Г.В. Пуйло // *Сучасні інформаційні технології 2012: матеріали першої міжнар. конф. студ. і молодих науковців, 26-27 квіт. 2012р.: тези доп.* / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, Издательство, 2012. – С.148-149.

6. Пуйло Г.В. Оптимизация рабочей частоты силовых трансформаторов с цилиндрическими слоевыми обмотками / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпаная // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2015. – №19(95) – С. 115-119.

7. Пуйло, Г.В. Математическое моделирование электромагнитных характеристик электротехнических сталея / Г.В. Пуйло, Д.М. Левин, Е.П. Насыпаная // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2011. – №6. – С. 29-32.

8. Коротков, В.С. Разработка трансформатора мощностью 20 МВА на основе ВТСП проводников второго поколения / В.С. Коротков // *Сверхпроводники для электроэнергетики*. – 2014. – Т. 11, №5. – С. 6-8.

9. Berti, R. Compararison of the ecoprofiles of superconducting and conventional 25 MVA transformers using the life cycle assessment methodology /Berti R., Barberis F., Rossi V., Martini L. // 20th International Conference on Electricity Distribution Prague, 8-11 June 2009.

10. Wang Yinshun Development and test in grid of 630 kVA three-phase high-temperature superconducting transformer / Yinshun Wang, Xiang Zhao, Junjie Han, Huidong LI, Yin Guan, Qing Bao, Xi Xu, Shaotao Dai, Naihao Song, Fengyuan Zhang, Liangzhen Lin, Liye Xiao // *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China* – 2009. – Vol. 4. – No. 1. – pp. 104-113.

Получено 30.04.2016

References

1. Innovative priorities of Ukraine fuel and energy complex, (2005), Kyiv, Ukrainian encyclopedic knowledges, 512 p. (In Ukraine).

2. Puilo G.V., Kuzmenko I.S., Tongaluk V.V. Sovremennyye tendentsii sovershenstvovaniya silovykh transformatorov [Modern tendencies of power transformers perfecting], (2008), *Electrical engineering and Electromechanics*, Kharkov, Ukraine, Vol. 2, pp. 48–52 (In Russian).

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

4. Puilo G.V., Nasypanaya E.P. Effectivnost primeneniya obmotok s vysokotemperaturnou sverhprovodimostiu v silovykh transformatorax [Efficiency of windings with high-temperature superconductivity application in power transformers], (2014), *Electronic and computer systems Publ.*, Odessa, Ukraine, Vol. 14(90), pp. 43–52 (In Russian).

5. Nasypanaya E.P., Puilo G.V. Perspektivy povysheniya resyrco- i energoeffektivnosti silovykh transformatorov [Prospects of power transformers resource- and energy efficiency increase], (2014), *Modern Information Technology 2012 Publ.*, Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine, pp. 148-149. (In Russian).

6. Puilo G.V., Nasypanaya E.P. Optimizatsiya rabochey chastoty silovykh transformatorov s cilindricheskimi sloevymi obmotkami [Optimization of power transformers with cylindrical layered windings working frequency], (2015), *Electronic and computer systems*, Odessa, Ukraine, Vol. 19(95), pp. 115-119 (In Russian).

7. Puilo G.V., Levin D.M., Nasypanaya E.P. Matematicheskoe modelirovaniye elektromagnitnykh kharakteristik elektrotexnicheskikh staley [Mathematical design electromagnetic description of electrotechnical steels], (2011), *Electrical engineering and Electromechanics*, Kharkov, Ukraine, Vol. 6, pp. 29–32 (In Russian).

8. Korotkov V.C. Razrabotka transformatora moschnostiy 20 MVA na osnove VTSP provodnikov vtorogo pokoleniya [Development of the transformer with a power of 20 MVA on the basis of the second generation HTS conductors], (2014), *Sverhprovodniki dlya electroenergetiki*, Vol. 5(11), pp. 6-8 (In Russian).

9. Berti R., Barberis F., Rossi V., Martini L. Compararison of the ecoprofiles of superconducting and conventional 25 MVA transformers using the life cycle assessment methodology, 2009, *20th International Conference on Electricity Distribution Prague*, pp. 1-20 (In English).

10. Wang Y., Zhao X., and Han J. Development and test in grid of 630 kVA three-phase high-temperature superconducting transformer, 2009, *Journal of Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, vol. 4(1), pp. 104-113 (In English).



Пуйло Глеб Васильевич
д-р техн. наук, проф.
каф. электр. машин
Одесского нац. политехн.
ун-та,
тел. (+38048) 734-8479



Насыпаная Елена
Петровна, к.т.н., ассистент
каф. электр. машин
Одесского нац. политехн.
ун-та.