

УДК 621.314

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОБМОТОК С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬЮ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Аннотация. Представлены методика и результаты расчетных исследований ресурсо- и энергоэффективности силовых распределительных трансформаторов стандартной и повышенной частоты при применении обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью. Для проектного синтеза трансформаторов использована новая методика идентификации характеристик электротехнических сталей при различных частотах. Процесс параметрической оптимизации реализован методом циклического покоординатного спуска.

Показано, что наибольшая ресурсо- и энергоэффективность у трансформаторов с повышенной рабочей частотой и сверхпроводящими обмотками.

Ключевые слова: распределительный трансформатор, высокотемпературная сверхпроводимость, частота, потери, капитализированные затраты, оптимизация, проектный синтез, проектные исследования, идентификация, математическая модель, электротехническая сталь, покоординатный спуск, ресурсоэффективность, энергоэффективность, методика, электромагнитная характеристика

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

EFFICIENCY OF WINDINGS WITH HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY APPLICATION IN POWER TRANSFORMERS

Abstract. A method and results of calculation researches resources and energy efficiency of standard and high frequency power distributive transformers at application windings with high-temperature superconductivity were presented. The new method of electrical engineering steels at different frequencies characteristics identification was used for the project synthesis. The process of parametric optimization was realized of the successive displacement method.

Transformers with high working frequency and superconductive windings has most resources and energy efficiency, were indicated.

Keywords: distributive transformer, high-temperature superconductivity, frequency, losses, capitalized expenses, optimization, project synthesis, project researches, identification, mathematical model, electrical engineering steel, resources and energy efficiency, method, electromagnetic description

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

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ОБМОТОК З ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЮ НАДПРОВІДНІСТЮ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Анотація. Представлені методика та результати розрахункових досліджень ресурсо- та енергоефективності силових розподільчих трансформаторів стандартної та підвищеної частоти при використанні обмоток з високотемпературною надпровідністю. Для проектного синтезу трансформаторів використовується нова методика ідентифікації характеристик електротехнічної сталі при різних частотах. Процес параметричної оптимізації реалізовано методом циклічного покоординатного спуска.

Показано, що найбільша ресурсо- та енергоефективність у трансформаторів з підвищеною робочою частотою та надпровідниковими обмотками.

Ключові слова: розподільчий трансформатор, високотемпературна надпровідність, частота, втрати, капіталізовані витрати, оптимізація, проектний синтез, проектні дослідження, ідентифікація, математична модель, електротехнічна сталь, покоординатний спуск, ресурсоефективність, енергоефективність, методика, електромагнітна характеристика

Введение. Существенный рост производства и потребления электрической энергии и, наряду с этим, старение силового электрооборудования энергетических систем ставят вопрос о необходимости модернизации энергосистем, о замене устаревшего оборудования на новое. По техническим показателям новое

оборудование должно соответствовать требованиям XXI века, оно должно быть эффективным, надежным, пожаробезопасным, экологически приемлемым. Жесткие требования предъявляются также к ограничению площади, занимаемой электрооборудованием, что приводит к необходимости уменьшения его размеров.

© Пуйло Г.В., Насыпаная Е.П., 2014

В современных энергетических системах существенную роль играют трансформаторные устройства. В трансформаторное оборудование вкладываются сотни тонн электротехнических материалов (электротехнической стали ЭТС, проводниковых материалов, изоляции и т.д.) Кроме того, вследствие многократной трансформации потери электроэнергии составляют существенную часть общих потерь в энергосистемах. В связи с этим проблема совершенствования силовых трансформаторов становится все более актуальной, а ее основными направлениями являются снижение потерь электрической энергии, расхода электротехнических и конструкционных материалов, повышение срока службы, надежности и экологичности.

Развитие современной науки и мирового трансформаторостроения приводят к разработке и постоянному расширению обширного арсенала инновационных средств повышения технико-экономического уровня трансформаторных устройств [1, 2, 3], использование которых зачастую тормозится вследствие действия различного рода экономических, экологических и других факторов.

Поэтому представляется целесообразным обосновать выбор из этого арсенала для первоочередного использования тех средств повышения ресурсо- и энергоэффективности трансформаторов, которые в условиях современной экономической ситуации наиболее перспективны, эффективны и наименее затратны. К таким средствам в первую очередь следует отнести применение высокотемпературных сверхпроводниковых материалов (ВТСП), так как наиболее выгодное промышленное применение сверхпроводимости связано с генерированием, передачей и потреблением электроэнергии [4, 5].

С появлением сверхпроводниковых материалов на основе висмута в лабораториях крупных энергетических компаний и научно-исследовательских институтов, промышленно развитых стран мира (США, Германия, Франция, Япония, Австралия, Швеция, Англия) стартовали проекты трёхфазных и однофазных ВТСП трансформаторов различной мощности и уровней напряжения, охлаждаемых жидким азотом. Все эти разработки про-

водились для трансформаторов стандартной промышленной частоты (50 – 60 Гц) [6, 7].

Сфера использования сверхпроводников постоянно расширяется и охватывает не только электроэнергетику и электротехнику, но и воздушный, морской и наземный транспорт. При проектировании, например, подвижного состава железных дорог [7] решающим фактором является снижение его массы, что позволяет обеспечить экономию электроэнергии и снизить расходы на содержание инфраструктуры. Одним из факторов, замедляющих широкое внедрение обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью, является их относительно высокая стоимость. Однако при повышении рабочей частоты трансформатора расход обмоточного провода значительно снижается, что может компенсировать повышенную стоимость обмоток из ВТСП при значительном уменьшении потерь и массы трансформатора. В [9] показано, что изменение частоты переменного тока в пределах 50 – 1000 Гц не оказывает существенного влияния на сверхпроводящие свойства ВТСП проводов. Отличительными свойствами таких трансформаторов являются уменьшение массы, безопасность, надежность, экологичность и низкие расходы на техническое обслуживание [10, 11, 12]. Поэтому весьма эффективным решением является использование сверхпроводящих тяговых трансформаторов, так как такие трансформаторы, даже вместе с их криостатами и запасом жидкого азота, будут иметь меньшую массу и суммарные потери по сравнению с обычными трансформаторами [4, 13].

Применение ВТСП технологий на современных военных кораблях позволяет обеспечить их энергетической системой, способной обеспечивать бесперебойную работу не только двигателей судна, но и современного вооружения. На подводных кораблях, при стесненных габаритах и ограниченном водоизмещении, можно установить легкое, компактное и в тоже время мощное электрооборудование на основе использования ВТСП и повышенной частоты. Такое техническое решение особенно перспективно в связи с существенным развитием и уменьшением стоимости современных преобразователей частоты.

Принципиальная конструктивная схема трансформатора с обмотками из ВТСП может оставаться неизменной, а его магнитная система (МС) исполняется либо “теплой” либо “холодной” [13].

“Холодное” исполнение предполагает расположение МС и обмоток внутри криостата, что с одной стороны, способствует упрощению конструкции криостата и некоторому уменьшению размеров магнитной системы, с другой стороны, вносит дополнительные теплопритоки, увеличивая потери в МС и энергозатраты на охлаждение.

“Тёплое” исполнение предполагает расположение МС вне криостата, что уменьшает теплопритоки в холодную часть и потери в МС.

Обмотки могут выполняться цилиндрическими слоевыми или катушечными. Жидкий азот служит одновременно и изоляцией и охлаждающей средой. Рабочая температура обмоток трансформатора от 77,3 К до 64 К [14, 15, 16].

Основными техническими характеристиками ВТСП проводов являются:

критическая температура T_k , ограничивающая предельную рабочую температуру;

критический ток I_k , максимально допустимый ток, протекающий по сверхпроводящему элементу без потери сверхпроводимости;

плотность критического тока элемента j_k .

Потери в обмотках из ВТСП пренебрежимо малы [14, 17]. На основе указанных характеристик для расчетных исследований выбрана конструкция цилиндрической слоевой обмотки как наиболее технологичной и компактной.

Постановка задачи исследования. Целью настоящей работы является расчетное исследование ресурсо- и энергоэффективности силовых распределительных трансформаторов при применении для обмоток как обычного алюминиевого или медного провода, так и ВТСП провода, для МС различных марок ЭТС и повышенной рабочей частоты до 500 Гц. Исследовались трансформаторы класса напряжений 10 кВ в диапазоне мощностей 63-630 кВА. Программа ис-

следований предусматривала выполнение проектного синтеза оптимальных по критерию капитализированных затрат Z_k вариантов трансформаторов при следующих исходных условиях:

1. Использование для МС ЭТС марок 3407, M123S, аморфной стали марки 2НРС и обмоток из обычного алюминиевого и медного проводов (ПБ, АПБ) при различных рабочих частотах (50 – 500 Гц).

2. Использование для МС ЭТС марок 3407, M123S, аморфной стали марки 2НРС и обмоток из ВТСП провода при рабочих частотах 50 – 500 Гц.

Конструктивное исполнение трансформаторов принято с обычными стыками, МС плоская шихтованная трехфазная, обмотки цилиндрические слоевые. Для трансформатора с ВТСП обмотками принято “теплое” исполнение.

Результаты выполненных исследований представлены в относительных единицах на примере трехфазного трансформатора ТМ 400/10 с плоской трехстержневой МС, изготовленной из ЭТС марки 3407 толщиной 0,35 мм, цилиндрическими слоевыми обмотками из провода марки АПБ и рабочей частотой 50 Гц. Основные технико-экономические параметры оптимального варианта этого трансформатора представлены в табл. 1. и приняты в качестве базовой единицы.

Для вариантов трансформаторов с ВТСП обмотками выбран провод компании American Superconductor Bi2223 в серебряной матрице с соотношением сторон 4.1×0.31 , критический ток которого 135 А, цена – 150\$/кА·м [6].

При решении задач оптимального проектирования и проектных исследований использовалась подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов “Аметист”, разработанная в Одесском национальном политехническом университете, которая легко дополняется модулями новых конструктивных видов МС и обмоток трансформаторов, а также программный комплекс Mahtcad. При разработке ММ в качестве основных управляемых переменных были выбраны переменные, характеризующие технико-экономические показатели трансформатора – отношение потерь короткого замыка-

ния к потерям холостого хода ξ и отношение стоимостей обмоток к стоимости МС x , а также индукция в стержне B . В качестве критерия использовался обобщенный показатель экономической эффективности – капитализированные затраты Z_k , включающий в себя затраты на трансформацию электроэнергии, стоимость активных материалов и суммарные потери ΣP [2, 18]. Поиск оптимального варианта выполняется методом циклическо-

го покоординатного спуска с учетом всего комплекса стандартных проектных ограничений. Для определения электромагнитных характеристик ЭТС по каталожным данным использовались алгоритмические математические модели (ММ), разработанные авторами [19, 20, 21, 22].

Результаты расчетных исследований приведены на рис. 1 – 5.

1. Основные технико-экономические данные оптимальных вариантов трансформатора 400/10 с МС из ЭТС 3407 толщиной 0,35 мм и алюминиевыми обмотками при различных рабочих частотах

Частота f , Гц	50	100	200	300	400	500
Индукция в стержне B , Тл	1,58	1,37	1,17	1,024	0,94	0,85
Отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода ξ , о.е.	4,75	3	1,95	1,35	1,04	0,9
Отношение стоимостей обмоток к стоимости МС x , о.е.	0,62	0,65	0,59	0,48	0,387	0,3
Напряжение короткого замыкания U_k , %	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Масса МС $G_{МС}$, кг	722	433	284	220	199	186
Масса обмоток $G_{обм}$, кг	194	119	66,7	44,7	31,7	24
Потери холостого хода $P_{хх}$, Вт	858	1076	1430	1872	2411	2687
Потери короткого замыкания $P_{кз}$, Вт	4075	3380	2900	2620	2480	2418
Капитализированные затраты Z_k , грн.	148617	122782	117470	122500	134654	146900

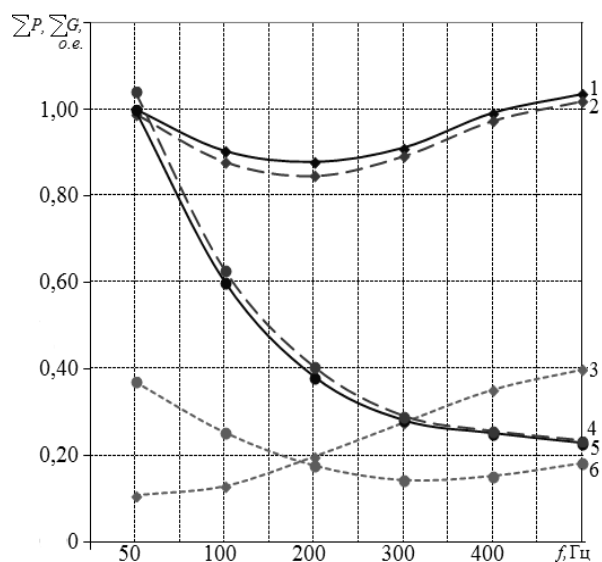


Рис. 1. Зависимость значений ΣP : (1 – Al; 2 – Cu; 3 – Bi2223) и суммы масс ΣG (4 – Cu; 5 – Al; 6 – Bi2223) для трансформаторов ТМ400/10, с МС из ЭТС 3407 толщиной 0,35 мм и с разными материалами обмоток от рабочей частоты

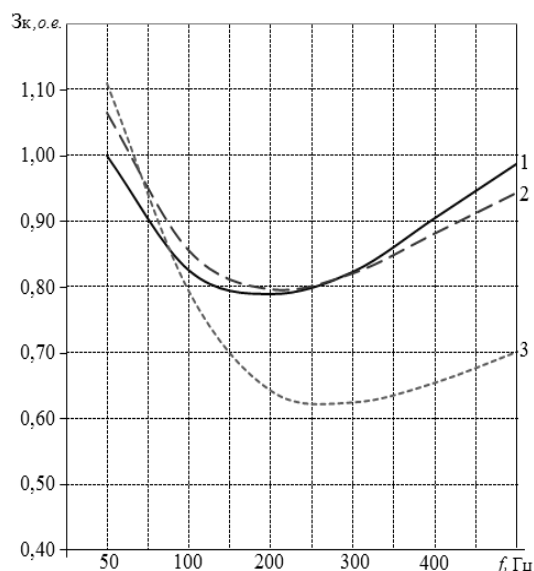


Рис. 2. Зависимость значений Z_k : (1 – Al; 2 – Cu; 3 – Bi2223) для трансформатора ТМ400/10, с МС из ЭТС 3407 толщиной 0,35 мм и с разными материалами обмоток от рабочей частоты

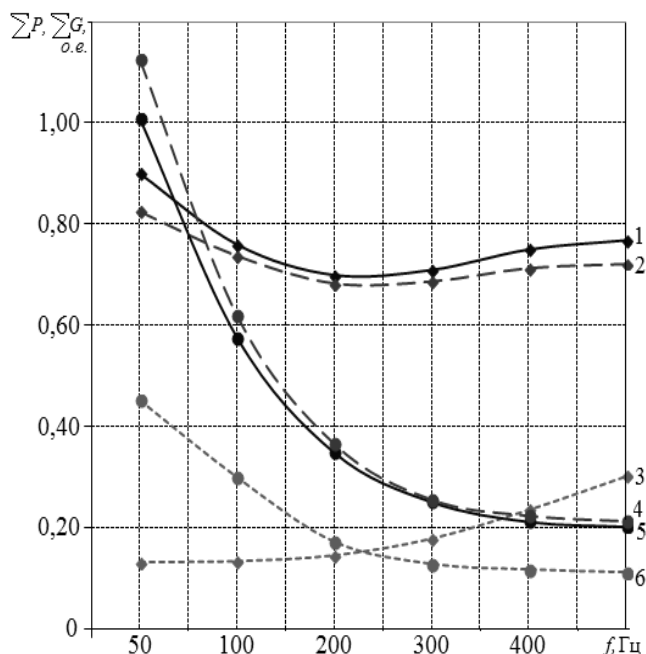


Рис. 3. Зависимости значений ΣP : (1 – Al; 2 – Cu; 3 – Bi2223) и ΣG (4 – Cu; 5 – Al; 6 – Bi2223) для трансформатора ТМ400/10, с МС из ЭТС М123S толщиной 0,23 мм и с разными материалами обмоток от рабочей частоты

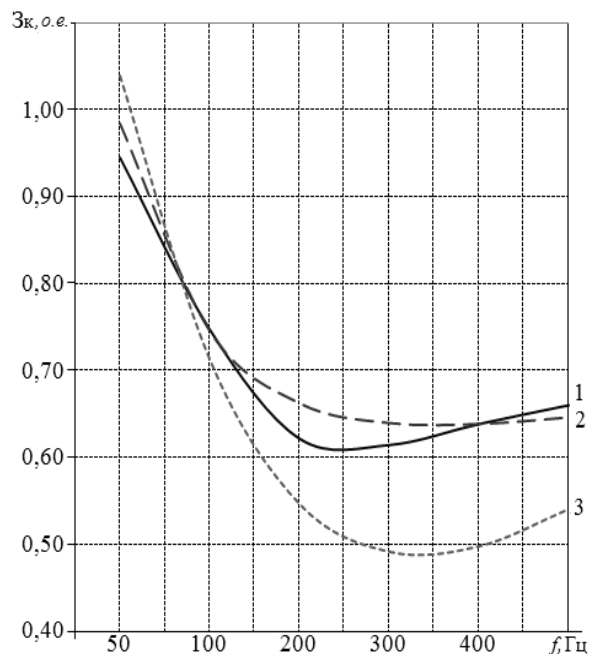


Рис. 5. Зависимость значений Z_k : (1 – Al; 2 – Cu; 3 – Bi2223) для трансформатора 400/10, с МС из ЭТС М123S толщиной 0,23 мм и с разными материалами обмоток от рабочей частоты

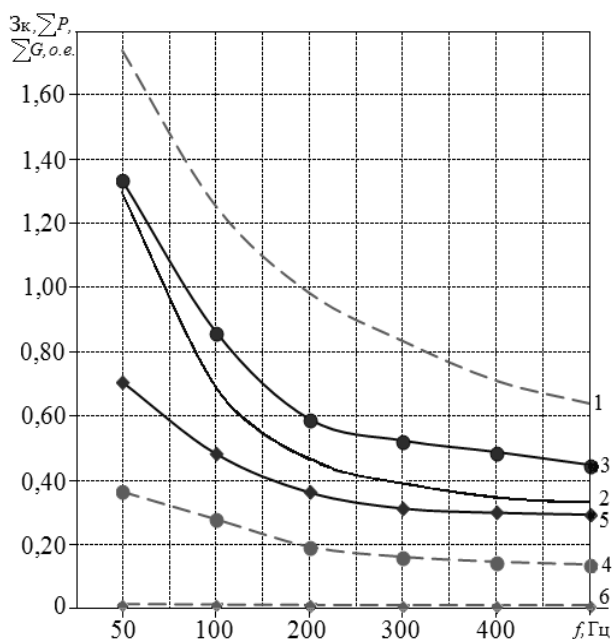


Рис. 4. Зависимости значений Z_k : (1 – Bi2223; 2 – Al), ΣP (5 – Al; 6 – Bi2223) и ΣG (3 – Al; 4 – Bi2223) для трансформатора 400/10, с МС из аморфной стали 2НСР толщиной 0,025 мм с разными материалами обмоток от рабочей частоты

Выводы. Анализ результатов выполненных исследований позволяет сформулировать следующие выводы:

- для оптимизированных вариантов трансформаторов, МС которых изготовлена из ЭТС марки 3407, а обмотки из традиционных проводниковых материалов (меди и алюминия), оптимальной по критерию капитализированных затрат является частота в диапазоне 250 – 300 Гц. У оптимального варианта с рабочей частотой 300 Гц суммарная масса активных материалов уменьшается на 72 %, суммарные потери на 9 %, а капитализированные затраты на 18 % по сравнению с базовым;

- для оптимизированных вариантов трансформаторов, МС которых изготовлена из улучшенной ЭТС марки М123S, а обмотки из меди и алюминия, оптимальной является частота 400 Гц, при этом суммарные потери снижены на 25 %, суммарная масса активных материалов на 80 %, а затраты на 36% по сравнению с базовым вариантом;

- применение аморфных сплавов для изготовления МС трансформаторов с об-

мотками из традиционных материалов и рабочей частотой 50 Гц позволяет снизить величину суммарных потерь на 29 %, однако приводит к увеличению суммарной массы активных материалов на 34 %, затрат на 30 % и уменьшению индукции в стержне на 11 % по сравнению с базовым вариантом. Оптимальной же является частота, превышающая 500 Гц. При рабочей частоте, равной 500 Гц, суммарные потери уменьшаются на 70 %, суммарная масса активных материалов на 55 %, а затраты на 66 % по сравнению с базовым;

– применение для обмоток ВТСП проводов и улучшенной ЭТС (M123S) при промышленной частоте 50 Гц позволяет снизить суммарные потери на 87 %, массу активных материалов на 55 %, однако увеличивает затраты на 4 % (из-за дороговизны ВТСП проводов). Применение для обмоток трансформатора ВТСП проводов при повышенной частоте 400 Гц уменьшает суммарные потери в трансформаторе на 76 %, расход активных материалов на 88%, капитализированные затраты на 50 %. Применение ВТСП провода также существенно повышает экологичность трансформаторов;

– применение ВТСП обмоток и аморфной стали в трансформаторах при промышленной частоте 50 Гц позволяет снизить суммарные потери на 98 %, массу активных материалов на 63 %, но приводит к увеличению затрат на 74 %. При повышенной частоте 500 Гц суммарные потери в трансформаторе снижаются на 98,8 %, расход активных материалов на 86 %, а капитализированные затраты на 36 %. Применение ВТСП обмоток и аморфной стали для изготовления МС трансформаторов, работающих на повышенных частотах, позволяет значительно уменьшить размеры трансформатора и является наиболее эффективным путем для снижения уровня потерь и экономии активных материалов.

Таким образом, полученные результаты приводят к выводу о том, что наиболее целесообразным для повышения ресурсо- и энергоэффективности распределительных трансформаторов является создание и внедрение серий распределительных трансфор-

маторов с МС из современных ЭТС с ВТСП обмотками в диапазоне рабочих частот 300 – 500 Гц.

Преимущества такого технического решения для трансформаторов состоят в следующем:

– снижение в 5 – 7 раз расхода активных материалов, так как при повышенной частоте резко уменьшается количество витков обмоток (расход ВТСП провода), размеры “окна” трансформатора и МС. Это, в свою очередь, существенно уменьшает объем криостата, мощность (и стоимость) криокулера для поддержания необходимой температуры в криостате;

– замена экологически опасного трансформаторного масла жидким азотом, получаемым из воздуха, обеспечивает экономичность и высокую экологичность трансформаторных устройств, избавляет от необходимости использования трансформаторного масла;

– повышение срока службы изоляции трансформатора, так как при рабочей температуре ВТСП провода изоляция не стареет;

– повышение надежности трансформатора вследствие ограничения кратности токов короткого замыкания;

– уменьшение габаритов трансформаторов и необходимой площади для их размещения.

Несмотря на относительно высокую стоимость ВТСП провода, предложенное техническое решение наиболее перспективно в связи с постоянным совершенствованием и расширением сферы применения ВТСП проводов и в других электротехнических устройствах, что предопределяет дальнейшее увеличение их производства и снижение стоимости.

Список использованной литературы

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

2. Силовые трансформаторы: справоч. кн. / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М. : Энергоиздат, 2004. – 616 с.
3. Інноваційні пріоритети паливно-енергетичного комплексу України. – К. : Українські енциклопедичні знання. – 2005. – 512 с.
4. Сверхпроводники для электроэнергетики [Электронный ресурс] / [Иванов С. С., Корецкая С. Т., Чернышова А. К. и др.]; под ред. Н. А. Черноплекова. – М. : Неотон, 2004. – Т.1., № 1. – 14 с. – Режим доступа: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein.php> (04.04.2009).
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 квітня 2012 р.: тези доп./ Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Одеського нац. политехн. ун-та. – Одеса : – 2012. – С.148 – 149.
6. Самойленков С. В. Сверхпроводниковая электротехника в Национальных Лабораториях США [Электронный ресурс] / С. В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики. – М. : 2008. – Т. 5. – № 1.–С.1 – 4. Режим доступа к журн.: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein.php> (07.04.2009)
7. Смаев М. П. Тенденции использования сверхпроводниковых технологий в Японии [Электронный ресурс] / М. П. Смаев // Сверхпроводники для электроэнергетики. – М. : – 2007. – Т. 4. – № 6. – С.9 – 11. Режим доступа к журн.: <http://perst.issph.kiae.ru/super-cond/bulletein.php> (04.04.2009).
8. Высокотемпературные сверхпроводники на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Харьков : – 2008. – №1.– С.52 – 57. Режим доступа к журналу: <http://www.zdmira.com/arhiv/2008/zdm2008no012#ТОС> (04.08.2011).
9. Шутова Д. И Успехи IRL в разработке и производстве токонесущих элементов типа Roebel на основе ВТСП проводников 2-го поколения [Электронный ресурс] / Д. И. Шутова// Сверхпроводники для электроэнергетики. – М. : – 2011. – Т.8. – № 1. – С.1 – 4. – Режим доступа к журналу : <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein.php> (11.03.2012).
10. Berti R., Barberis F., Rossi V., and Martini L. Comparison of the Ecoprofiles of Superconducting and Conventional 25 MVA Transformers Using the Life Cycle Assessment Methodology, (2009), *20th International Conference on Electricity Distribution Prague*, 8 – 11 June 2009.
11. Pefkov R. Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer, (1996), *Transactions on Power Electronics, IEEE*, No. 11(1), pp.33 – 42.
12. Stavrev S. Modelling of High-temperature Superconductors for AC Power Applications, (2002), These No. 2579 (2002), *École Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)*, Lausanne, – 207 p.
13. Данько В. Г. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні: монографія / В. Г. Данько, І. С. Полянська, Є. В. Гончаров; за ред. В. Г. Данько. – Харьков : НТМТ, 2011.– 248 с.
14. Hata H., Kamijo H., Fujimoto H., and Nagashima K. Development of a Superconducting Transformer for Rolling Stock, (2006), *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Japan*, No. 41(1).pp. 24 – 27.
15. Wang Yinshun, Xiang Zhao, Junjie Han, Huidong LI, Yin Guan, Qing Bao, Xi Xu, Shaotao Dai, Naihao Song, Fengyuan Zhang, Liangzhen Lin, Liye Xiao. Development and Test in grid of 630 kVA three-phase High-temperature Superconducting Transformer, (2009), *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, Vol. 4, No. 1, pp. 104 – 113.
16. Xiaoyuan Chen, and Jin Center Jianxun. Development and Technology of HTS Transformers, (2007), *Research Communication*, Vol. 1, No. 1, pp. 6 – 7.
17. Krasl M., and Rybar J. Losses in Windings of Superconducting Traction Transformer, 2D and 3D Model, (2006), *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*,

Tenerife, Spain, December 16 – 18, pp. 307 – 309.

18. Thomas L. Baldwin, John I. Ykema, Cliff L. Allen, and James L. Langston. Design Optimization of High-temperature Superconducting Power Transformers, (2003), *Transactions on Applied Superconductivity, IEEE*, No.13(2), pp. 2344 – 2347.

19. Corhodzic S., and Kalam A. Assessment of distribution transformers using loss capitalization formulae, (2000), *Australia Journal of Electrical and Electronics engineering*, Vol. 1, pp. 43 – 48.

20. Nasypanaya E. Determination of the specific losses in steel of the high-frequency transformers for the optimization of induction level in their magnetic systems / E. Nasypanaya // Интеллект, Интеграция, Надійність: сучасн. IV міжнар. конф. студ. та молодих вчених, 21-22 квіт. 2011 р.: тези доп. / Міністерство освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України “КПІ” –К. : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2011. – С. 36 – 37

21. Насыпаная Е. П. Подход к расчету удельных потерь в электротехнических сталях / Е. П. Насыпаная // Труды Одесского нац. политехн. ун-та: Науч. и производственно-практический сб. по технич. и естественным наукам. – Одесса : 2010. – № 1. – С. 116 – 123.

22. Пуйло Г. В. Автоматизированный синтез математических моделей характеристик электротехнических сталей / Г. В. Пуйло, Д. М. Левин, Е. П. Насыпаная // *Электротехніка та комп'ютерні системи*. – Одеса : – 2011. – № (03)79. – С. 305 – 306.

23. Пуйло Г. В. Математическое моделирование электромагнитных характеристик электротехнических сталей / Г. В. Пуйло, Д. М. Левин, Е. П. Насыпаная // *Электротехніка і Електромеханіка*. – Харьков : – 2011. – № 6. – С.29 – 32.

Tendencies of Power Transformers Perfecting], (2008), *Electrical engineering and Electromechanics*, Kharkov, Ukraine, No. 2, pp. 48 – 52 (In Russian).

2. Lizunova S.D., and Lokhanina A.K. Silovye transformatory: cpravoch. kn. Pod red. S. D. Lizunova, A. K. Lohanina, [Power Transformers [Handbook], (2004), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat*, 616 p. (In Russian).

3. Innovacijni prioriteti palivno-energetичного комплексу України, [Innovative Priorities of Ukraine Fuel and Energy Complex], (2005), *Ukrainian Encyclopedic Knowledge*, Kiev, Ukraine, 512 p. (In Ukrainian).

4. Ivanov S.S., Koreckaya S.T., Chernyshova A.K. and other. Sverhprovodniki dlja jelektrojenergetiki, (2004), [Superconductors for the Electric Power Industry], *Neoton*, (Electronic Resource), Moscow, Russian Federation, Vol.1, No.1, 14 p., Access to the magazine: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bullein.php> (04.04.2009) (In Russian).

5. Nasypanaya E.P., and Puiilo G.V. Perspektivy povysheniya resurso- i jenergojeffektivnosti silovyh transformatorov [Aspects of Power Transformers Resources and Energy Efficiency Increase, Modern Information Technologies], (2012), *Materials of the First International Students and Young Scientists Conference, 26-27 April 2012*, Abstracts, Ministry of education and science of Ukraine, *Odessa National Polytechnic University*, Odessa, *Publishing House*, pp. 148 -149 (In Russian).

6. Samoylenkov S.V. Sverhprovodnikovaja jelektrotehnika v Nacional'nyh Laboratorijah SShA [Superconductor Electrical Engineering in National Laboratories of the USA] *Superconductors for Electric Power Industry*, (Electronic resource), Moscow, Russian Federation, (2008), Vol.5, No. 1, pp. 1 – 4, Access to the magazine: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bullein.php> (07.04.2009) (In Russian).

7. Smaev M.P. Tendencii ispol'zovanija sverhprovodnikovyh tehnologij v Japonii, [Tendencies of the Superconductor Technologies Using in Japan], (2007), *Superconductors for Electric Power Industry*, (Electronic re-

Получено 07.04.2014

References

1. Puiilo G.V., Kuzmenko I.S., Tongaluk V.V. Sovremennye tendencii sovershenstvovanija silovyh transformatorov, [Modern

source), Moscow, Russian Federation, Vol. 4, No. 1, pp. 9 – 11, Access to the magazine: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulleitein.php> (04.04.2009) (In Russian).

8. Vysokotemperaturnye sverhprovodni-ki na zheleznodorozhnom transporte [High-temperature Superconductors on the Railway Transport] (2008), *Railways of the World*, (Electronic resource), Kharkov, Ukraine, No. 1, pp. 52 – 57, Access to the magazine: <http://www.zdmira.com/arhiv/2008/zdm2008no012#TOC> (04.08.2011) (In Russian).

9. Shutova D.I. Uspehi IRL v razrabotke i proizvodstve tokonesushhih jelementov tipa Roebel na osnove VTSP provodnikov 2-go pokolenija [Successes of IRL in Development and Production of Roebel type Current-carrying Elements on the Basis of 2th generation HTS conductors], (2011), *Superconductors for Electric Power Industry*, (Electronic resource), Moscow, Russian Federation, Vol. 8, No. 1, pp. 1 – 4, Access to the magazine: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulleitein.php> (11.03.2012) (In Russian).

10. 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, 8-11 June 2009* (In English).

11. Pefkov R. Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer, *Transactions on Power Electronics, IEEE*, Vol. 11, No. 1, January, 1996, pp. 33 – 42 (In English).

12. Stavrev S. Modelling of High-temperature Superconductors for AC Power Applications, These No. 2579 (2002), *École Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)*, 207 p. (In English).

13. Danko V.G. Viktoristannja visokotemperaturnoi nadprovidnosti v elektroenergetichnomu obladdanni: monografija [High-Temperature Superconductivity Using in Electric Power Industry Equipment], (2011), *Monograph*, Kharkov, Ukraine, 248 p. (In Ukrainian).

14. Hata H., Kamijo H., Fujimoto H., and Nagashima K. Development of a Superconducting Transformer for Rolling Stock,

(2006), *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, Japan, Vol. 41, No. 1, pp. 24 – 27 (in English).

15. Wang Yinshun, Xiang Zhao, Junjie Han, Huidong Li, Yin Guan, Qing Bao, Xi Xu, Shaotao Dai, Naihao Song, Fengyuan Zhang, Liangzhen Lin, Liye Xiao Wang Yinshun Development and Test in Grid of 630 kVA three-phase High-temperature Superconducting Transformer, (2009), *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, Vol. 4, No. 1, pp. 104 – 113 (In English).

16. Xiaoyuan Chen and Jim Center Jianxun Development and Technology of HTS Transformers, (2007), *Research Communication*, Vol. 1, No. 1, pp. 6 – 7 (In English).

17. Krasl M., and Rybar J. Losses in Windings of Superconducting Traction Transformer, 2D and 3D Model, (2006), *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Confonferens on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, Spain, December 16-18*, pp. 307 – 309 (In English).

18. Thomas L. Baldwin, John I. Ykema, Cliff L. Allen, James L. Langston Design Optimization of high-temperature Superconducting Power Transformers, *Transactions on applied superconductivity*, (2003), *IEEE*, Vol. 13, No. 2, pp. 2344 – 2347 (In English).

19. Corhodzic S. and Kalam Assessment of Distribution Transformers Using Loss Capitalization Formulae, (2000), *Victoria University of Technology*, Melbourne, Australia, Vol. 1, pp.43 – 48 (In English).

20. Nasypanaya E. Determination of the Specific Losses in Steel of the High-frequency Transformers for the Optimization of Induction Level in their Magnetic Systems, (2011), *Intelligence, Integration, Reliability: IV international students and young scientists conference, 21-22 April 2011*, Abstracts, Ministry of Education and Science of Ukraine, National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute, *Publishing House Politekhnik*, pp. 36 – 37 (In English).

21. Nasypanaya E.P. Podhod k raschetu udel'nyh poter' v jelektrotehnicheskikh staljah [Approach to the Calculation of Specific Losses in Electrical Engineering Steel, (2010), *Transaction of Odessa National Polytechnic*

University, Scientific and Production-practical Collection on Engineering's and Natural Sciences, Odessa, Ukraine, No. 1, pp. 116 – 123 (In Russian).

22. Puilo G.V., Levin D.M., Nasypanaya E.P. Avtomatizirovannyj sintez matematicheskikh modelej harakteristik jelektrotehnikeskikh stalej [Automatic Synthesis of Electrical Engineering Steels Characteristics Mathematical Models], (2011), *Electrotechnical Engineering and Computer Systems*, Odessa, Ukraine, No. (03)79, pp. 305 – 306 (In Russian).

23. Puilo G.V., Levin D.M., Nasypanaya E.P. Matematicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh harakteristik jelektrotehnikeskikh stalej [Mathematical Design of Electrical Engineering Steels Electromagnetic Characteristics], (2011), *Electrical Engineering and Electromechanics*, Kharkov, Ukraine, No. 6, pp.29 –32 (In Russian).



Пуйло Глеб Васильевич,
д-р техн. наук, проф.
каф. электрических ма-
шин Одесского нац. поли-
техн. ун-та,
тел. (+38048) 734-8479



Насыпаная
Елена Петровна,
аспирантка каф.
электрических машин
Одесского нац. поли-
техн. ун-та