

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С КОМБИНАЦИЯМИ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБМОТОК

Г. В. Пуйло, Е. П. Насыпаная, Т. В. Махтин

Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. На основе обобщенной проектной математической модели распределительного трансформатора выполнен анализ технико-экономической эффективности применения в них комбинации обмоток из различных проводниковых материалов. Рассмотрена возможность сочетаний концентроров обмоток из традиционных проводниковых материалов (меди и алюминия) с концентрорами из провода с высокотемпературной сверхпроводимостью при рабочих частотах 50 и 300 Гц. Рассмотренные варианты комбинаций материалов обмоток оптимизированы по критерию полной капитализированной стоимости.

Ключевые слова: распределительный трансформатор, проводниковые материалы, проектные исследования, критерий оптимизации, технико-экономические параметры, капитализированная стоимость, энергоэффективность, ресурсоэффективность, высокотемпературная сверхпроводимость, удельная электропроводимость.

Введение

Повышение энергоэффективности энергосистем, обеспечивающих выработку, передачу и распределение электрической энергии, остается ключевой проблемой и в XXI веке. Одним из важнейших аспектов в этой проблеме является необходимость радикального уменьшения потерь электрической энергии в силовых трансформаторах. Это обусловлено прежде всего тем, что суммарная установленная мощность трансформаторного парка обычно в 7–9 раз больше установленной мощности источников электрической энергии на снабжающих их электрических станциях. Поэтому, несмотря на существенное улучшение параметров силовых трансформаторов новых серий, уровень потерь электрической энергии в них остается относительно высоким. Так, только в странах ЕС в 2010 году потери в распределительных трансформаторах составили около 1/3 всех общих потерь [1].

Выполненные в мировом трансформаторостроении в последние 30 лет глубокие теоретические и фундаментальные исследования привели к созданию мощного научного базиса, инновационных электротехнических материалов, технических решений, технологических процессов для повышения энергоэффективности, ресурсоэффективности и экологичности силовых трансформаторов [2]. Однако темпы использования

этих инновационных достижений в трансформаторостроении по ряду технических и, особенно, экономических причин недостаточно высоки.

Постановка задачи исследования

В настоящей работе поставлена задача исследования эффективности применения силовых трансформаторов с комбинацией (сочетанием) обмоток трансформатора высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения из различных проводниковых материалов как при естественном масляном охлаждении (традиционная система охлаждения М), так и при криогенных температурах (охлаждение жидким азотом). При этом рассмотрено использование обмоток из традиционных проводниковых материалов (медь, алюминий) [3] в сочетании с высокотемпературным сверхпроводниковым (ВТСП) проводом [4, 5]. Поскольку повышение рабочей частоты значительно снижает расход активных материалов и размеры активной части, то проектные исследования целесообразно выполнить как для вариантов со стандартной рабочей частотой (50 Гц), так и для вариантов с повышенной (близкой к оптимальной) частотой 300 Гц.

Общим критерием экономической эффективности выбран общепринятый критерий капитализированной стоимости трансформатора C_k [6]. Цены на активные материалы приняты по данным [7, 8, 9] и приведены в таблице 1.

Таблиця 1

Цены на активные материалы трансформатора

Цена алюминиевого обмоточного провода, \$/кг	4
Цена медного обмоточного провода, \$/кг	6
Цена ВТСП провода, \$/кА·м	40
Цена электротехнической стали, \$/кг	2

Процентная ставка r для расчета коэффициента капитализации принята равной 14%, срок службы трансформатора $n = 25$ лет, а средняя стоимость электроэнергии $C_{э} = 0,073$ \$/кВт·ч.

Для обмоток выбран ВТСП провод компании American Superconductor Bi2223 в серебряной матрице с соотношением сторон $4,1 \times 0,31$, критический ток которого 135 А.

При криогенном охлаждении значительную долю полной стоимости трансформатора составляет стоимость системы охлаждения с криокулером, которая существенно зависит от значения мощности отводимых потерь. Эта зависимость, полученная по данным [10, 11], приведена на рис. 1.

Расчетные исследования приведены на примере трехфазного трансформатора с номинальной мощностью 400 кВ·А, класса напряжения 10 кВ, магнитная система (МС) – трехстержневая, выполненная из электротехнической стали (ЭТС) марки М120-23S, толщиной 0,23 мм, обмотки – цилиндрические слоевые.



Рис. 1. Зависимость удельной стоимости 1 Вт отводимой криокулером мощности потерь в обмотках $C_{охл}$ от суммарной мощности отводимых потерь $P_{охл}$

Конструктивная схема исследуемого распределительного трансформатора для всех вариантов сочетания материалов обмоток и систем охлаждения не изменяется.

Для оптимального проектного синтеза вариантов трансформатора с обмотками из рассматриваемых видов проводниковых материалов и их сочетаний использована обобщенная математическая модель трансформатора, инвариантная к числу концентров обмоток, материалу обмоточного провода и рабочей частоте [12]. Алгоритм поиска оптимальных параметров основывается на методе циклического покоординатного спуска.

Результаты исследований

При выполнении проектных исследований процесс проектного синтеза и анализа разделен на три этапа.

На первом этапе исследована возможность повышения энергоэффективности трансформаторов за счет резкого уменьшения удельного электрического сопротивления обмоток (ρ_3) из меди ($\rho_{3Cu} = 0,001$ Ом·мм²/м) и алюминия ($\rho_{3Al} = 0,003$ Ом·мм²/м) при криогенной температуре (температуре кипения жидкого азота) 77 К, то есть при их работе в тех же условиях, в которых работают обмотки из ВТСП провода [13, 14]. Рабочая частота исследуемых трансформаторов – 50 Гц. Полученные данные оптимальных вариантов трансформатора с обмотками из ВТСП провода и данные оптимальных вариантов трансформатора с медными и алюминиевыми обмотками при стандартной рабочей температуре для изоляции класса А представлены в таблице 2.

Данные таблицы 2 показывают, что у трансформатора с медными и алюминиевыми обмотками, работающими при криогенной температуре, суммарные потери снижаются в 3–4 раза, масса ЭТС – в 1,6 раза, масса обмоток в 2,2–2,9 раз по сравнению с трансформаторами с естественным масляным охлаждением, но из-за сверхвысокой стоимости отвода потерь в обмотках капитализированные затраты возрастают в 9,1–9,7 раз.

Здесь наиболее эффективным оказывается вариант трансформатора с ВТСП обмотками, у которого C_k возрастает только втрое, но суммарные потери уменьшаются в 16 раз, масса ЭТС – в 3 раза, масса обмоток – в 6 раз.

На втором этапе исследованы параметры трансформатора при комбинации обмоток из медного и алюминиевого провода с обмоткой из ВТСП провода при рабочей частоте трансформатора 50 Гц (табл. 3).

Наилучшие параметры, как по уровню суммарных потерь, так и по уровню C_k , оказываются у варианта ВТСП – алюминий при выполнении

Таблиця 2

Основные параметры оптимизированных вариантов трансформатора 400 кВ·А, 10 кВ при различных проводниковых материалах обмоток и рабочей частоте 50 Гц

Показатель		Параметры				
		Al	Cu	ВТСП (77 К)	Al (77 К)	Cu (77 К)
Материал обмоток	–	Al	Cu	ВТСП (77 К)	Al (77 К)	Cu (77 К)
Индукция в стержне, Тл	B_c	1,59	1,58	1,51	1,58	1,6
Диаметр стержня, мм	$D_{ст}$	187	207	140	154	163
Высота обмоток, мм	$H_{обм}$	591	331	358	635	387
Ширина обмоток, мм	$F_{обм}$	164	148	20	78	54
Потери короткого замыкания, Вт	P_k	3595	3664	31	887	642
Потери холостого хода, Вт	P_o	799	752	243	474	441
Масса МС, кг	$G_{мс}$	756	746	249	460	405
Масса обмоток, кг	$G_{обм}$	202	317	54	91	109
Плотность тока обмотки НН, А/мм ²	j_1	1,3	2,37	15	3,45	7,74
Плотность тока обмотки ВН, А/мм ²	j_2	1,05	1,84	18,17	2,62	6,54
Напряжение короткого замыкания, %	U_k	4,3	4,7	4,43	5	4,63
Сума потерь, Вт	$\sum P$	4394	4416	274	1361	1083
Масса активных материалов, кг	$G_{ам}$	958	1063	303	551	514
Стоимость активных материалов, \$	$C_{ам}$	2121	2809	42820	2238	2591
Стоимость криогенной установки, \$	$C_{кв}$	–	–	24750	105015	105002
Полная капитализированная стоимость, \$	C_k	11490	12202	75899	111691	111506

обмотки НН из ВТСП провода. Это обусловлено тем, что, наряду со снижением нагрузочных потерь снижен расход дорогостоящего ВТСП провода.

Несмотря на то, что у этого варианта, по сравнению с оптимальным вариантом с обеими обмотками из ВТСП провода (табл. 2), суммарные потери больше почти на 20 %, а масса активных материалов выше на 40 %, капитализированная стоимость уменьшилась в 2,6 раза, а стоимость активных материалов – в 14 раз. Таким образом, этот вариант является наилучшим по показателям энергоэффективности и экономического параметрам.

На третьем этапе выполнен оптимальный проектный синтез вариантов исследуемого трансформатора с рабочей частотой 300 Гц и комбинацией обмоток, при которой одна выполнена из ВТСП провода, а другая из медного или алюминиевого провода. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Варианты трансформаторов с обмоткой НН из ВТСП провода и обмоткой ВН из меди либо алюминия при рабочей частоте 300 Гц по уровню минимальной капитализированной стоимости оказались практически равноценными. В трансформаторе с комбинацией обмоток ВТСП–Cu суммарные потери уменьшились на 13 %, а масса активных материалов на 2% по сравнению с вариантом трансформатора с обмотками ВТСП–Al.

Вариант трансформатора с комбинацией обмоток ВТСП–Cu оказывается даже более экономичным по сравнению с вариантом трансформатора, у которого обе обмотки выполнены из ВТСП провода.

В варианте трансформатора с комбинацией обмоток ВТСП–Cu при рабочей частоте 300 Гц по сравнению с вариантом трансформатора, у которого обе обмотки выполнены из ВТСП провода и рабочей частотой 50 Гц, масса активных материалов снижена в 2 раза, стоимость активных материалов в 2,8 раза, а полная капитализированная стоимость уменьшилась в 1,3 раза.

При рабочей частоте 300 Гц у варианта трансформатора с комбинацией обмоток ВТСП–Cu суммарные потери уменьшились на 37 %, стоимость активных материалов на 98,5 %, а полная капитализированная стоимость на 70% по сравнению с вариантом трансформатора, у которого обе обмотки выполнены из ВТСП провода.

Увеличение суммарных потерь в варианте трансформатора с обмотками из ВТСП провода и рабочей частотой 300 Гц объясняется тем, что с ростом частоты растет величина добавочных потерь в ВТСП обмотках, которая пропорциональна частоте.

Выводы

Полученные результаты выполненных исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

Таблиця 3

Параметры оптимизированных вариантов трансформатора 400 кВ·А, 10 кВ при комбинации обмоток из медного и алюминиевого провода с обмоткой из ВТСП провода при рабочей частоте 50 Гц

Показатель	–	Параметры			
		НН – ВН			
		ВТСП–Cu	ВТСП–Al	Cu–ВТСП	Al–ВТСП
Материал обмоток	–	ВТСП–Cu	ВТСП–Al	Cu–ВТСП	Al–ВТСП
Индукция в стержне, Тл	B_c	1,5	1,49	1,46	1,51
Диаметр стержня, мм	$D_{ст}$	140	130	230	190
Высота обмоток, мм	$H_{обм}$	535	800	145	310
Ширина обмоток, мм	$F_{обм}$	41	60	53	62
Потери короткого замыкания, Вт	P_k	93	43	267	29
Потери холостого хода, Вт	P_o	290	283	743	537
Масса МС, кг	$G_{мс}$	319	342	694	528
Масса обмоток, кг	$G_{обм}$	107	94	70	75
Плотность тока обмотки НН, А/мм ²	j_1	12,5	12,5	6,9	3,17
Плотность тока обмотки ВН, А/мм ²	j_2	6,54	2,9	3,1	9,09
Напряжение короткого замыкания, %	U_k	4,4	4,48	4,5	4,5
Сума потерь, Вт	$\sum P$	383	326	1010	566
Масса активных материалов, кг	$G_{ам}$	426	436	764	603
Стоимость активных материалов, \$	$C_{ам}$	3274	3088	29650	36960
Стоимость криогенной установки, \$	$C_{кв}$	46042	24750	46037	24746
Полная капитализированная стоимость, \$	C_k	50707	29076	79319	63918

Таблиця 4

Основные параметры оптимизированных вариантов распределительного трансформатора 400 кВ·А, 10 кВ с рабочей частотой 300 Гц и комбинацией обмоток из медного и алюминиевого провода с обмоткой из ВТСП провода

Показатель	–	Параметры				ВТСП
		НН – ВН				
		ВТСП–Cu	ВТСП–Al	Cu–ВТСП	Al–ВТСП	
Материал обмоток	–	ВТСП–Cu	ВТСП–Al	Cu–ВТСП	Al–ВТСП	ВТСП
Индукция в стержне, Тл	B_c	1,11	1,097	1,074	1,05	1,13
Диаметр стержня, мм	$D_{ст}$	80	90	120	140	125
Высота обмоток, мм	$H_{обм}$	763	650	285	210	148
Ширина обмоток, мм	$F_{обм}$	21	35	22	40	21
Потери короткого замыкания, Вт	P_k	38	32	56	42	74
Потери холостого хода, Вт	P_o	647	753	1063	1456	1009
Масса МС, кг	$G_{мс}$	114	132	165	220	140
Масса обмоток, кг	$G_{обм}$	50	34	33	26	20
Плотность тока обмотки НН, А/мм ²	j_1	10,4	11,4	7,01	2,9	15,6
Плотность тока обмотки ВН, А/мм ²	j_2	6,54	2,3	9,01	9,09	9,1
Напряжение короткого замыкания, %	U_k	4,64	4,41	4,54	4,9	4,5
Сума потерь, Вт	$\sum P$	685	785	1119	1498	1083
Масса активных материалов, кг	$G_{ам}$	164	166	198	246	160
Стоимость активных материалов, \$	$C_{ам}$	1332	1108	13770	12700	93160
Стоимость криогенной установки, \$	$C_{кв}$	24741	24742	24738	24739	46030
Полная капитализированная стоимость, \$	C_k	28743	28925	42880	43334	95636

– применение традиционных проводниковых материалов (меди и алюминия) для обмоток трансформаторов, работающих при криогенной температуре 77 К и рабочей частоте 50 Гц, позволяет повысить ресурсоэффективность транс-

форматорного устройства в 2 раза, энергоэффективность в 3,5 раза, однако стоимость системы охлаждения является достаточно высокой;

– в исследованных вариантах трансформаторов с комбинациями проводниковых материалов обмоток более эффективными оказались те

варианты, у которых обмотка НН была выполнена из ВТСП провода, а обмотка ВН из медного либо алюминиевого. У этих вариантов при рабочей частоте 50 Гц ресурсоэффективность увеличилась в 1,3 раза, энергоэффективность в 3 раза, а экономическая эффективность в 2,3 раза по сравнению с вариантами трансформаторов с обмотками из традиционных проводниковых материалов при криогенной температуре 77 К;

- при применении обмоток трансформаторов с комбинацией проводниковых материалов ВТСП–Cu либо ВТСП–Al и увеличении рабочей частоты в 6 раз (до 300 Гц), ресурсоэффективность увеличилась в 2,5 раза, а экономическая эффективность в 1,75 раза, однако наблюдается снижение энергоэффективности в 1,8–2,4 раза по сравнению с аналогичными вариантами с рабочей частотой 50 Гц.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее целесообразным является создание распределительных трансформаторов с комбинациями обмоток ВТСП–Cu либо ВТСП–Al и предназначенных для рабочих частот, превышающих 50 Гц. Преимуществами таких трансформаторов является их высокая ресурсоэффективность, энергоэффективность, экономическая эффективность, а также экологическая эффективность. Для дальнейшего повышения энерго- и ресурсоэффективности трансформаторов необходимо существенное снижение стоимости устройств, обеспечивающих криогенные температуры.

Список использованной литературы

1. Мельникова, Е. В. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов [Текст] / Е. В. Мельникова // Энергосбережение. – 2003. – № 6 – С. 66–70.
2. Пуйло, Г. В. Современные тенденции совершенствования силовых трансформаторов [Текст] / Г. В. Пуйло, И. С. Кузьменко, В. В. Тонгалюк // Електротехніка та електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 48 – 52.
3. Пуйло, Г. В. Оптимальный проектный синтез трансформаторов с комбинацией обмоток из различных проводниковых материалов [Текст] / Г. В. Пуйло, Е. П. Насыпаная // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 16(92). – С. 59 – 64.
4. Пуйло, Г. В. Эффективность применения обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью в силовых трансформаторах [Текст] / Г. В. Пуйло, Е. П. Насыпаная // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 14(90). – С. 43–52.
5. Желтов, В. В. Перспективы использования высокотемпературных сверхпроводников [Текст] / В. В. Желтов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2011. – № 6. – С. 11–22.
6. Corhodzic, S. Assessment of distribution transformers using loss capitalization formulae [Text] / S. Corhodzic, A. Kalam // Journal of Electrical and Electronics engineering. Australia. – 2000. – Vol. 1. – P. 43–48.
7. Самойленко, С. Развитие технологии ВТСП-лент 2-го поколения в ЗАО “СуперОкс” [Электронный ресурс] / С. Самойленко, А. Кауль, А. Кучаев. – Москва: ЗАО ” СуперОкс”, 2012. – Режим доступа: <http://www.superox.ru>.
8. Самойленков, С. В. Перспективы европейской сверхпроводимости [Текст] / С. В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики. – 2009. – №3. – С. 5-6.
9. Смаев, М. П. Мировой рынок сверхпроводников: история и прогнозы [Текст] / М. П. Смаев // Сверхпроводники для электроэнергетики. – 2008. – № 2. – С. 8–9.
10. Haberstroh, Ch. Cryogenic Cooling Options for sc Applications [Text] / Ch. Haberstroh // Tampere sc conference. Technische Universität Dresden, 5th Novtmber – 2010. – 30 p.
11. Bi, Y. F. Cooling and Cryocoolers for HTS Power Applications [Text] / Y. F. Bi // Applied superconductivity and electromagnetic – 2013. – Vol. 4 – No. 1. – pp. 97–180.
12. Насипана, О. П. Моделювання і проектний синтез енергоефективних трансформаторів з циліндричними шаровими обмотками [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / ОНПУ. – Одеса, 2015. – 21 с.
13. Справочник по электрическим материалам [Текст] / под ред. Ю. В. Корецкого, В. В. Пасынкова. – Л.: Энергия, 1988. – 728 с.
14. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

References

1. Melnikova, E. V. (2003). An energy-savings in Europe: application of energy effective transformers [EHnergosberezhenie v Evrope: primeneniye ehnergoehffektivnyh transformatorov], *EHnergosberezhenie*, No.6, pp. 66–70.
2. Pujlo, G. V., Kuz'menko, I. S., Tongalyuk, V. V. (2005). Modern tendencies of power transformers improvement [Sovremennyye tendencii sovershenstvovaniya silovykh transformatorov], *Elektrotekhnika ta Elektromekhanika*, No. 2, pp. 48 – 52.
3. Pujlo, G. V., Nasypanaya, E. P. (2014). Optimal design synthesis of transformers with a combi-

nation of windings from various conduction materials [Optimal'nyj proektnyj sintez transformatorov s kombinacij obmotok iz razlichnyh provodnikovyh materialov], *EHlektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy*, No. 16(92), pp. 59 – 64.

4. Pujlo, G. V., Nasypanaya, E. P. (2014). “Efficiency of windings with high-temperature superconductivity application in power transformers [Effektivnost' primeneniya obmotok s vysokotemperaturnoj sverhprovodimost'yu v silovyh transformatorah], *EHlektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy*, No. 14(90), pp. 43 – 52.

5. ZHeltov, V. V. (2011). Prospects for the high-temperature superconductors using [Perspektivy ispol'zovaniya vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov], *EHnergiya: ehkonomika, tekhnika, ehkologiya*, No. 6, pp. 11–22.

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

7. Samojlenko, S., Kaul', A., Kuchaev A. (2012). The development of the 2nd generation HTSC technology of “Superox” [Razvitie tekhnologii VTSP-lent 2-go pokoleniya v ZAO “SuperOks”], *ZAO “SuperOks”, Moskva*, available at: <http://www.superox.ru>.

8. Samojlenkov, S. V. (2009). Perspective for the European superconductivity [Perspektivy evropejskoj sverhprovodimosti], *Sverhprovodniki*

dlya ehlektroehnergetiki, No. 3, pp. 5–6.

9. Smaev, M. P. (2008). The global market for superconductors: history and forecasts [Mirovoj rynek sverhprovodnikov: istoriya i prognozy], *Sverhprovodniki dlya ehlektroehnergetiki*, No.2, pp.8–9.

10. “Haberstroh, Ch. (2010). Cryogenic Cooling Options for sc Applications, *Tampere sc conference. Technische Universität Dresden, 5th November*, 30 p.

11. Bi, Y. F. (2013). Cooling and Cryocoolers for HTS Power Applications, *Applied superconductivity and electromagnetic*, Vol. 4, No. 1, pp. 97–180.

12. Nasypana, O. P. (2015). Modeling and design synthesis of energy-efficient transformers with cylindrical layered windings [Modelyuvannya i proektnyj sintez energoefektyvnyx transformatoriv z cylindrychnymy sharovymy obmotkami: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk], *Odesa*, 21 p.

13. Koreckiy, YU. V., Pasyukov, V. V. (1988). Electrical materials handbook [Spravochnik po ehlektricheskim materialam], *EHnergiya, Leningrad*, 728 p.

14. Lizunov, S. D., Lohanin, A. K. (2004). Power transformers. Handbook [Silovye transformatory. Spravochnaya kniga], *EHnergoizdat, Moscow*, 616 p.

THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFECTIVENESS ANALYSIS OF POWER TRANSFORMER WITH COMBINATIONS WINDINGS CONDUCTION MATERIALS

G. V. Pujlo, E. P. Nasypanaya, T. V. Mahtin

Odessa National Polytechnic University

Abstract. The results of power transformers calculation researches which ways of energy efficiency and resource efficiency increase is application of such innovative technical solutions as using of modern conduction materials combination at cryogenic temperature (the liquid nitrogen boiling temperature) and optimization of the transformed electric energy parameters. The analysis of technical and economic effectiveness of application in the distribution transformer windings with various conduction materials combination was made on the basis of its generalized design mathematical model. This mathematical model was adapted to the number of transformer windings circles, to a type of conduction materials, and its components were presented as the pozinomials functions. It allows to organize effective structural and parametrical optimization of the transformer with windings from various conduction materials of the successive displacement method. The possibility of windings circles from traditional conduction materials (copper and aluminium) with high-temperature superconductivity windings circles combinations at the working frequencies of 50 and 300 Hz was considered. The 400 kVA three-phase power transformers with flat three-rod magnetic systems made of brand M120-23S thick 0,23 mm electrotechnical steel with the cylindrical layered winding were chosen for design researches. The considered variants of windings materials combinations were optimized by the total capitalized cost criterion.

Key words: the distribution transformer, conduction materials, design researches, criterion of optimization, technical and economic parameters, the capitalized cost, energy efficiency, resource efficiency, high-temperature superconductivity, specific electric conductance.

АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА З КОМБІНАЦІЯМИ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ОБМОТОК

Г. В. Пуйло, О. П. Насыпана, Т. В. Махтін

Одеський національний політехнічний університет

Анотація. На основі узагальненої проектної математичної моделі розподільного трансформатора виконаний аналіз техніко-економічної ефективності застосування в них комбінації обмоток з різних провідникових матеріалів. Розглянута можливість поєднань концентрів обмоток з традиційних провідникових матеріалів (міді і алюмінію) з концентрами з проводу з високотемпературною надпровідністю при робочих частотах 50 і 300 Гц. Розглянуті варіанти комбінацій матеріалів обмоток, оптимізовані за критерієм повної капіталізованої вартості.

Ключові слова: розподільний трансформатор, провідникові матеріали, проектні дослідження, критерій оптимізації, техніко-економічні параметри, капіталізована вартість, енергоефективність, ресурсоефективність, високотемпературна надпровідність, питома електропровідність.

Получено 19.01.2017



Пуйло Глеб Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: Pujlo@ukr.net, тел. +38-048-734-84-79

Gleb Pujlo, Dr. of Science, Professor of the Electric machines department, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID 0000-0003-4392-6869



Насыпаная Елена Петровна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: nasypanaya_elena@mail.ru, тел. +38-048-734-84-79

Elena Nasypanaya, Cand. of Science, Senior lecturer of the Electric machines department, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID 0000-0002-6350-4826



Махтин Тарас Владимирович, студент кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: tarasmakhtin@gmail.com

Taras Mahtin, Student of the Electric machines department, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID 0000-0001-8669-6560