

НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Проведено дослідження й аналіз нових підходів при побудові шихтованих магнітопроводів силових трансформаторів, які полягають в одночасному використанні в магнітопроводі анізотропної та ізотропної електротехнічної сталі, що дозволяє будувати трансформатори з підвищеним коефіцієнтом корисної дії й з меншою вартістю. Бібл. 3, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: силовий трансформатор, нові шихтовані магнітопроводи, анізотропна сталь, ізотропна сталь, втрати у магнітопроводі, КПД.

Проведено исследование и анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, которые заключаются в одновременном применении в магнитопроводе анизотропной и изотропной электротехнической стали, позволяющий строить трансформаторы с повышенным коэффициентом полезного действия и с меньшей стоимостью. Библ. 3, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: силовой трансформатор, новые шихтованные магнитопроводы, анизотропная сталь, изотропная сталь, потери в магнитопроводе, КПД.

Введение. В статье [1] авторами был представлен анализ тенденций развития трехфазных шихтованных магнитопроводов трансформаторов напряжением до 1000 В. Рассмотренные подходы применимы и при построении трансформаторов среднего и высокого напряжения, а также реакторов, при наличии специальных требований. Данная статья продолжает анализ тенденций развития современных технологий и материалов, используемых в трансформаторостроении.

Анализ условий работы трансформаторов в сетях показывает, что обычно они нагружены мощностью значительно меньшей номинальной. Поэтому Североамериканские стандарты (NEMA TP 1-2002, CAN/CSA C802.2) регламентируют коэффициент полезного действия (КПД) при нагрузке на уровне 35 % для трансформаторов низкого напряжения и 50 % для трансформаторов среднего и высокого напряжения.

Одним из главных факторов, влияющих на параметры и свойства трансформатора, является материал и конструкция магнитопровода.

В статье приведен анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, который заключается в одновременном применении в магнитопроводе различных типов электротехнических сталей (ЭТС).

Целью статьи является определение подходов, позволяющих обеспечить высокие технико-экономические и технологические показатели трансформаторов, обеспечение их высоких энергетических характеристик – малых потерь холостого хода (х.х.) и высоких значений КПД. Это актуальная задача развития современного энергетического рынка.

Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов. На протяжении длительного времени одним из основных способов обеспечения низкого уровня потерь х.х. трансформаторов остается применение в магнитопроводах холоднокатаной анизотропной ЭТС, в которой домены направлены (структурированы) вдоль прокатки листов, что обеспечивает высокие магнитные свойства стали за счет уменьшения магнитного сопротивления прохождению магнитного потока в этом направлении.

Металлургия постоянно совершенствует структуру ЭТС благодаря оптимизации химического состава стали и особенностям технологического процесса ее изготовления. Также наблюдается тенденция уменьшения толщины листа ЭТС. На Североамериканском рынке трансформаторов широко применяются анизотропные ЭТС марок М6 и М4 соответственно с толщинами листов 0,35 и 0,28 мм. Также используются стали марок М3 и М2 с толщинами листов 0,23 и 0,18 мм соответственно. Здесь перечисление марок ЭТС приведено по возрастанию анизотропности свойств и стоимости стали.

Применение ЭТС высокой степени анизотропности позволяет получить отличные магнитные свойства при прохождении магнитного потока вдоль прокатки стального листа. Однако, при прохождении потока под другими углами к направлению прокатки, магнитные свойства стали резко ухудшаются, причем тем сильнее, чем больше степень анизотропности.

Сейчас наиболее распространенной конструкцией магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов является общеизвестная классическая конструкция стержневого шихтованного магнитопровода, схематично представленная на рис. 1.

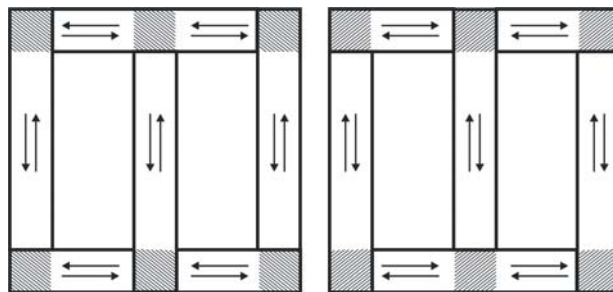


Рис. 1. Классическая конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора

На рис. 1 в незаштрихованных областях магнитопровода магнитный поток, в большей части, проходит вдоль направления прокатки листов ЭТС и анизотропность здесь позволяет значительно снизить потери х.х.

В заштрихованных областях магнитопровода магнитный поток проходит под разными углами к направлению прокатки (от 0° до 90°) при переходе из стержней в ярма, что вызывает значительное увеличение потерь х.х. Таким образом, в одних областях магнитопровода наблюдается значительное улучшение магнитных свойств, а в других – их ухудшение. В связи с этим, применение дорогостоящих высококачественных анизотропных ЭТС не приводит к экономически оправданному уменьшению потерь х.х. трансформатора. То есть, стоимость магнитопровода возрастает столь существенно, что эффект от снижения потерь х.х. и увеличения КПД становится не всегда экономически выгодным.

Уменьшение толщины листа так же уменьшает потери х.х. за счет снижения потерь от вихревых токов, но возникает проблема обеспечения жесткости конструкции магнитопровода в связи с гибкостью стержней, что требует применения специальных мер.

В последнее время усилия направлены на разработку новых изотропных (неструктурированных) сталей с высокими магнитными свойствами, например марки М12. Подобные стали позволяют избежать существенного увеличения потерь в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма.

Постоянно растущие требования к энергосбережению стимулируют поиск новых конструктивных решений с использованием существующих ЭТС. Так, разработан новаторский подход при построении трехфазных и однофазных магнитопроводов, который заключается в одновременном использовании анизотропной и менее дорогой изотропной стали. Например, в патенте [2] предложено изготавливать стержни из анизотропной, а ярма из изотропной стали одинаковой толщины (рис. 2).

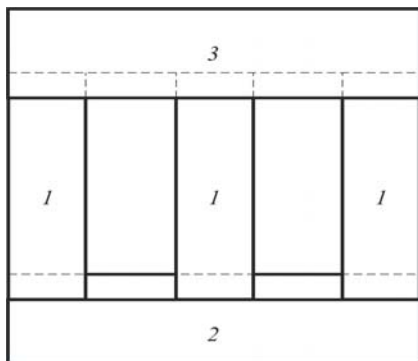


Рис. 2. Конструкция "Staggered" трехфазного шихтованного магнитопровода трансформатора

На рис. 2 приведена конструкция трехфазного шихтованного магнитопровода "Staggered", в которой 1 – пластины анизотропной ЭТС; 2 и 3 – пластины изотропной ЭТС. Данная конструкция обеспечивает присутствие изотропной стали в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма, уменьшает количество пластин анизотропной стали стержней в этих зонах и длину пути прохождения магнитного потока в анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки в данных зонах. Удельные потери в листе изотропной стали при прохождении магнитного потока под разными углами к направлению прокатки

листа практически одинаковы, хотя и больше удельных потерь анизотропной стали при прохождении в ней магнитного потока вдоль прокатки листа. Но эти потери значительно ниже удельных потерь анизотропной стали при прохождении в ней магнитного потока поперек прокатки листа. Применение изотропной стали в ярмах магнитопровода "Staggered" позволяет снизить удельные потери на участках ярем в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма. В этих зонах снижение потерь оказывается столь существенным, что перекрывает возрастание потерь на участках ярем между стержнями магнитопровода, поскольку в трансформаторах низкого напряжения (до 1000 В) окна магнитопровода, как правило, имеют небольшую ширину. Такое использование разных типов ЭТС позволяет снизить потери х.х. трансформатора и существенно уменьшить стоимость магнитопровода из-за разницы в цене сталей.

Как видно из рис. 2, пластины ЭТС ярем 3 выполняются шире пластин 2 (на 6,4...12,7 мм [2]) для улучшения условий перехода магнитного потока из стержней в ярма, уменьшения магнитной индукции и удельных потерь в ярмах. Однако, в виду особенностей этой конструкции, имеет место необходимость удлинения стержней, так как часть стержней (6,4...12,7 мм с каждой стороны) скрадывается ярмами и не используется. Это приводит к увеличению общей стоимости магнитопровода, поскольку стержни изготавливаются из дорогой анизотропной стали.

Применение трех типоразмеров пластин с прямым резом в конструкции магнитопровода "Staggered" не существенно усложняет технологию изготовления магнитопровода, по сравнению с классической конструкцией. Благодаря прямому резу пластин ЭТС данная конструкция практически не приводит к возникновению дополнительных активных потерь в магнитопроводе, по сравнению с конструкцией MULTI-STEP LAP с косым стыком (см. работу [1]).

Основным конструкционным недостатком магнитопровода "Staggered" является малая зона шихтованного соединения стержней с ярмами, что снижает механическую прочность конструкции магнитопровода, особенно при длительной эксплуатации трансформатора из-за разупрочнения соединений в результате вибраций.

Применение различных типов сталей в магнитопроводах трансформаторов стало отправной точкой на пути создания высокоэффективных и экономичных трансформаторов.

Новые высокоэффективные и экономичные трансформаторы. М. Levin, независимо от авторов патента [3], предложил в шихтованном магнитопроводе трансформатора использовать разные типы сталей, полностью исключая анизотропную ЭТС из зон перехода магнитного потока из стержней в ярма, замещая ее изотропной ЭТС (рис. 3, 4). Такие типы шихтовки пластин ЭТС получили название "Sandwich".

На рис 3, 4 представлены некоторые варианты шихтовки типа "Sandwich", где показаны два слоя расположения пластин а и б, которые поочередно накладываются друг на друга при сборке магнитопровода.

Пластины 2 и 3 на рис. 3 и пластины 2 на рис. 4 выполнены из анизотропной стали, а пластины 1 и 4 на рис. 3 и пластины 1, 3 и 4 на рис. 4 – из изотропной стали. Для обоих вариантов шихтовки магнитопровода применяется четыре типоразмера пластин одинаковой ширины с прямым резом. При таких шихтовках зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма состоят из 100 % изотропной стали.

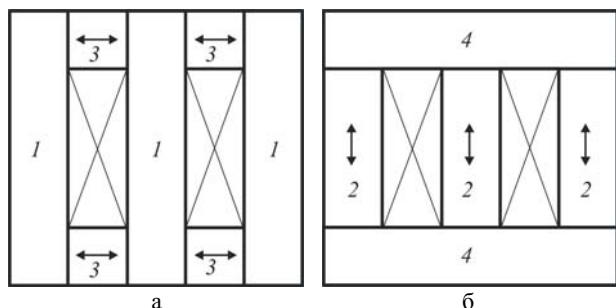


Рис. 3. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа "Sandwich" с вертикальными и горизонтальными изотропными вставками

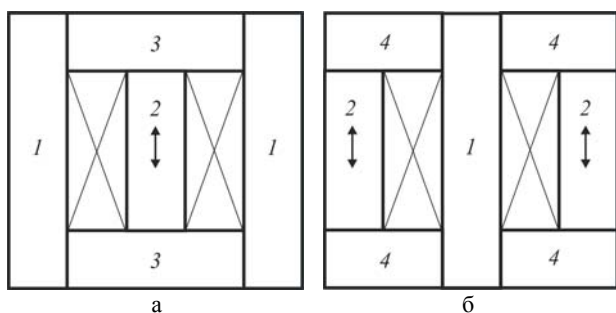


Рис. 4. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа "Sandwich" только с вертикальными изотропными вставками

Изменяя количество рядов применяемых слоев на рис. 3 и 4 можно изменять соотношение между изотропной и анизотропной сталью в стержнях магнитопровода. Подобная возможность изменения соотношения содержания анизотропной и изотропной стали в стержнях и ярмах позволяет осуществлять более глубокую технико-экономическую оптимизацию трансформатора.

В табл. 1, в качестве примера, приведены некоторые из возможных вариантов шихтовок с 80 %, 75 %, 67 % и 50 % анизотропной стали и соответственно 20 %, 25 %, 33 % и 50 % изотропной стали в стержнях и 100 % изотропной сталью в ярмах магнитопроводов.

Таблица 1

Пропорция сталей в стержне (анизотропная / изотропная)	Комбинации слоев для различных шихтовок		
	Количество слоев		
	рис. 3,б	рис. 4,а	рис. 4,б
50 % / 50 %	–	2	2
67 % / 33 %	2	2	2
75 % / 25 %	4	2	2
80 % / 20 %	3	1	1

В варианте шихтовки на рис. 3 при сборке верхнего ярма необходимо принять меры для удерживания пластин 3 и повышения требований к точности сборки.

По механическим характеристикам магнитопроводы на рис. 3 и 4 равноценны магнитопроводу на рис. 1, поскольку перекрытие пластин происходит на всю ширину ярма.

Для уменьшения потерь х.х. ярма можно выполнять пластинами большей ширины. Так как в ярмах используется изотропная сталь, которая значительно дешевле анизотропной стали, то это экономически довольно эффективный способ снижения потерь х.х. в трансформаторе.

Подобная шихтовка магнитопроводов позволяет значительно уменьшить потери х.х. трансформатора, существенно уменьшить стоимость магнитопровода и повысить КПД трансформатора. Такие магнитопроводы позволяют создавать трансформаторы с так называемым повышенным КПД. При этом данные трансформаторы получаются значительно экономичнее трансформаторов, в которых применяется только анизотропная сталь.

Следует отметить, что основным требованием к магнитопроводам типа "Staggered" и "Sandwich" является одинаковая толщина листов используемых сталей, что является ограничивающим фактором. На мировых рынках можно найти небольшое количество марок изотропной и анизотропной стали одинаковой толщины. Например, в Северной Америке это стали марок М6 и М12, в Китае – 35Q145 и 35WW270.

Анализ новых шихтовок магнитопроводов.

Сравним основные технико-экономические показатели трансформаторов (табл. 2) с шихтовкой магнитопровода "Staggered" и "Sandwich" (рис. 2 и 4). В трансформаторе с магнитопроводом "Sandwich" использовалась пропорция 50 % М6 и 50 % М12 в стержнях и 100 % М12 в ярмах, а в трансформаторе с магнитопроводом "Staggered" – 100 % М6 в стержнях и 100 % М12 в ярмах.

Таблица 2

Параметры трансформаторов

Параметры	Тип шихтовки магнитопровода	
	"Staggered"	"Sandwich"
Сопrotивление КЗ, %	2,42	2,26
Потери х.х., Вт	493	491
Масса меди, кг	86,6	98,2
Масса ЭТС, кг	323,1	305,9
Стоимость меди и ЭТС, USD	2174	2194

Трансформаторы имеют мощность 112,5 кВ·А, первичное напряжение 480 В, вторичное – 208 В, частота питающей сети 60 Гц, соединение обмоток треугольник/зигзаг. Трансформаторы соответствуют стандарту NEMA TP1-2002 (стандарт регламентирует уровень КПД при 35% нагрузке и сопротивление короткого замыкания (КЗ) обмоток при температуре 75 °С). Трансформаторы оптимизированы на минимуме стоимости.

Из табл. 2 видно, что трансформаторы имеют очень близкие параметры.

На рис. 5 приведены зависимости КПД трансформаторов с шихтовкой магнитопровода "Staggered" и "Sandwich". Более высокие значения КПД имеет трансформатор "Sandwich", особенно это проявляется

в области больших нагрузок. Учитывая современные высокие требования к трансформаторам, это является большим достоинством. При этом технология сборки магнитопроводов с шихтовкой "Sandwich" подобна технологии сборки классического шихтованного магнитопровода (рис. 1) и не требует особых дополнительных трудозатрат.

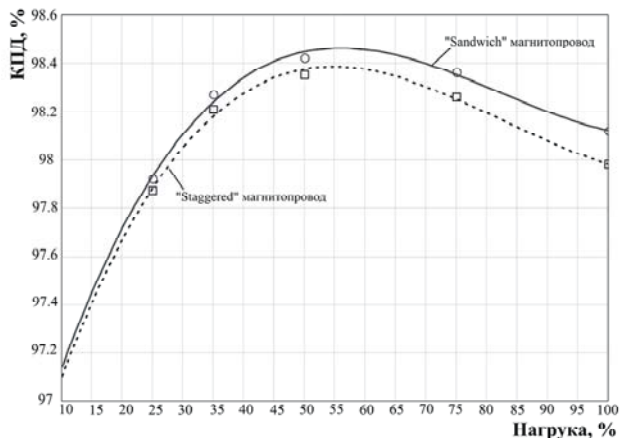


Рис. 5. Зависимости КПД трансформаторов с шихтовкой магнитопровода "Staggered" (пунктирная линия) и "Sandwich" (сплошная линия) от уровня нагрузки

Определим оптимальное соотношение анизотропной и изотропной стали в магнитопроводе с шихтовкой "Sandwich".

На первый взгляд может показаться, что чем больше содержание анизотропной стали в стержнях, тем меньше потери х.х. и выше КПД трансформатора. При этом стоимость трансформатора также снижается за счет уменьшения площади поперечного сечения стержней из-за возможности увеличения в них значения магнитной индукции и уменьшения длины витков обмотки. Но это не подтверждается практикой.

Были исследованы и проведены сравнения свойств более 30 построенных трансформаторов мощностью от 15 до 500 кВ·А, напряжением от 208 до 600 В, частотой питающей сети 60 Гц, соединением обмоток треугольник/звезда, треугольник/зигзаг, звезда/зигзаг. Магнитопроводы трансформаторов выполнены с шихтовкой "Sandwich" с содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях магнитопровода 50 % М6 и 50 % М12; 80 % М6 и 20 % М12, в ярмах — 100 % М12. Шихтовка магнитопроводов производилась согласно табл. 1 соответственно заданной пропорции сталей.

Эксперимент показал, что в результате увеличения количества анизотропной стали в стержнях магнитопровода с 50 % до 80 % не наблюдалось снижения потерь х.х., хотя, логично было бы ожидать их уменьшения.

Для выявления причины этого рассмотрим более детально участок соединения ярма и стержня на рис. 6 для шихтовки с соотношением стали в стержнях 80 % М6 и 20 % М12. На рис. 6 четыре пластины стержня стыкуются с четырьмя пластинами ярма, а одна пластина напрямую переходит из стержня в ярмо.

Здесь происходит локальное насыщение части этой одной пластины на участке, где она переходит из

стержня в ярмо и насыщение пластин, граничащих с данной пластиной. Это связано с наличием немагнитного зазора в зоне стыка четырех пластин, вынуждающего существенную часть магнитного потока проходить через эту пластину и через крайние пластины, граничащие с ней.



Рис. 6. Участок соединения ярма (вверху) и стержней (внизу)

Подобные процессы, ведущие к увеличению потерь х.х. наблюдаются в магнитопроводе с классической шихтовкой (рис. 1) при чередовании слоев с количеством рядов пластин более двух.

С целью определения зависимости потерь в магнитопроводе от количества рядов пластин в слое были построены трансформаторы с классической конструкцией стержневого шихтованного магнитопровода (рис. 1) с 1-м, 2-мя, 3-мя и 4-мя рядами пластин в слое.

На рис. 7 приведен график зависимости увеличения потерь в магнитопроводе с разным количеством рядов пластин в слое относительно потерь в магнитопроводе с 1-м рядом пластин в слое.

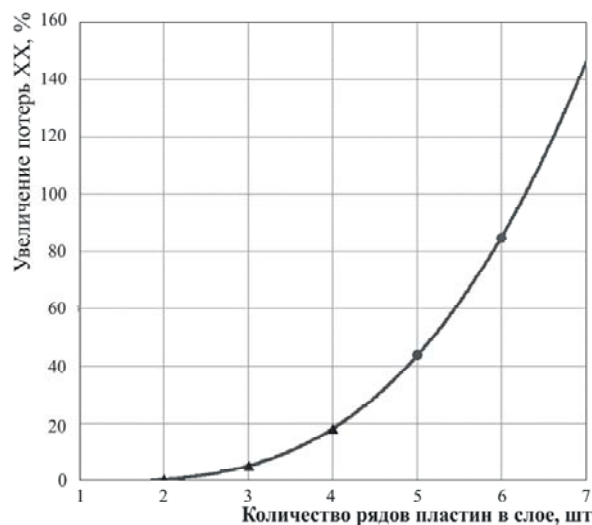


Рис. 7. Зависимость потерь х.х. трансформаторов с чередующимися слоями шихтовки магнитопровода, выполненных с разным количеством рядов пластин

На графике треугольниками обозначены экспериментальные данные 4-х трансформаторов, точками — интерполяционные данные.

Количество рядов пластин в одном слое шихтовки значительно влияет на величину потерь х.х. трансформаторов с классической шихтовкой.

Подобное увеличение потерь х.х. наблюдается и при использовании шихтовки магнитопроводов "Sandwich" с пропорцией стали 80 % М6 и 20 % М12, где имеет место соединение в стык 4-х пластин стержня с 4-мя пластинами ярма, на что указывают результаты тестов более 40 трансформаторов. Это же

подтверждается расчетами потерь х.х., которые при такой шихтовке оказываются выше приблизительно на 15 % по сравнению шихтовкой "Sandwich" 50 % М6 и 50 % М12, где имеет место соединение в стык 2-х пластин стержня с 2-мя пластинами ярем.

Поэтому, построение магнитопроводов с содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях 80 % М6 и 20 % М12, нецелесообразно, поскольку приводит к увеличению потерь х.х. трансформатора и его стоимости из-за применения большого количества анизотропной стали.

Таким образом, магнитопроводы с содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях 50 % М6 и 50 % М12 являются наиболее эффективными и имеют наиболее оптимальные технико-экономические показатели.

Результатом исследований также является разработка авторами теоретических обоснований картины распределения магнитного потока в магнитопроводе с одновременным использованием различных типов сталей, что позволило создать методику расчета потерь х.х. Расчетные потери х.х., сделанные по созданной методике, показали практически полное совпадение с тестами реальных трансформаторов (точность расчета составляет 99 %). Авторы планируют более подробно осветить вопросы расчета потерь х.х., для таких трансформаторов в последующих публикациях.

Выводы.

Проведен анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, которые заключаются в совместном использовании в магнитопроводе анизотропной и изотропной электротехнической сталей, позволяющий строить трансформаторы с повышенным коэффициентом полезного действия.

Для снижения уровня потерь холостого хода трансформатора и повышения коэффициента полезного действия необходимо исключение анизотропной стали из областей перехода магнитного потока из стержней в ярма (областей шихтованных стыков) и одновременное использование анизотропной и изотропной стали в стержнях и ярмах магнитопровода в разных пропорциях.

Определено оптимальное соотношение анизотропной и изотропной стали в магнитопроводе. Магнитопроводы с половинным содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях и ярмах и полностью выполненным из изотропной стали шихтованным стыком являются наиболее оптимальными по технико-экономическим показателям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levin M.I., Пентегов И.В., Рымар С.В., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – №1. – С. 40-44.
2. Pat. US 6100783 A USA, Int. Cl. H 01 F 27/24. Energy Efficient Hybrid Core / Philip J. Hopkinson (Charlotte, N.C. (US)), Wesley W. Schwarz (Oshkosh, Wis. (US)); Assignee Square D Company, Palatine, Ill (US). – № US 09/251102; Appl. Date 16.02.1999; Publ. Date 08.08.2000.

3. Pat. US 8686824 B2 USA, Int. Cl. H 01 F 27/24; H 01 F 17/04. Economical Core Design for Electromagnetic Devices / Michael Levin, Andrii V. Lavreniuk (Toronto (CA)); Mirus International Inc. (Ontario (CA)). – № US 12/883310; Appl. Date 16.09.2010; Publ. Date 01.04.2014.

REFERENCES

1. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.1, pp. 40-44. (Rus).
2. Pat. US 6100783 A USA, Int. Cl. H 01 F 27/24. Energy Efficient Hybrid Core / Philip J. Hopkinson (Charlotte, N.C. (US)), Wesley W. Schwarz (Oshkosh, Wis. (US)); Assignee Square D Company, Palatine, Ill (US). – № US 09/251102; Appl. Date 16.02.1999; Publ. Date 08.08.2000.
3. Pat. US 8686824 B2 USA, Int. Cl. H 01 F 27/24; H 01 F 17/04. Economical Core Design for Electromagnetic Devices / Michael Levin, Andrii V. Lavreniuk (Toronto (CA)); Mirus International Inc. (Ontario (CA)). – № US 12/883310; Appl. Date 16.09.2010; Publ. Date 01.04.2014.

Поступила (received) 14.10.2014

*Levin Michael I.¹, P. Engineer,
Пентегов Игорь Владимирович², д.т.н., проф., в.н.с.,
Рымар Сергей Владимирович², д.т.н., с.н.с., в.н.с.,
Lavreniuk Andrii V.³, Ph. D., R&D Engineer,
¹ 67, Sunnycrest Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4,
тел/phone +1 (416) 6677061,
e-mail: michael@mirusinternational.com*

*² Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11,
тел/phone +38 044 2061388,
e-mail: i.v.pentegov@gmail.com, elmag@paton.kiev.ua
³ MIRUS International Inc.,
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6,
тел/phone +1 (905) 4941120,
e-mail: andrii@mirusinternational.com*

*M.I. Levin¹, I.V. Pentegov², S.V. Rymar², A.V. Lavreniuk³
¹ 67, Sunnycrest Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4.*

*² Paton Electric Welding Institute of National Academy
of Sciences of Ukraine,
11, Bozhenko Str., Kiev, 03680, Ukraine.*

*³ Mirus International Inc.,
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6.*

New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers.

It is carried out exploration and the assaying of new approaches at construction of stacked laminated cores of mains transformers which consists in simultaneous application in a magnetic conductor of the anisotropic and isotropic electric grade sheet, allowing constructing transformers with the heightened efficiency and with smaller cost. References 3, tables 2, figures 7.

Key words: mains transformer, new laminated cores, anisotropic steel, isotropic steel, losses in a magnetic conductor, efficiency.