

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Проведено аналіз та дослідження властивостей й параметрів різних типів шихтованих магнітопроводів силових трифазних трансформаторів. Встановлено, що більшість нових конструкцій шихтованих магнітопроводів мають серйозні недоліками, викликані конструкційними й технологічними особливостями процесу їх виготовлення. Ці недоліки ведуть до збільшення активних втрат у магнітопроводі, що нівелює їх переваги та не дозволяє їм конкурувати із класичною шихтованою конструкцією магнітопроводу.*

*Проведен анализ и исследование свойств и параметров различных типов шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов. Установлено, что большинство новых конструкций шихтованных магнитопроводов, обладают серьезными недостатками, вызванными конструктивными и технологическими особенностями процесса их изготовления. Эти недостатки ведут к увеличению активных потерь в магнитопроводе, что нивелирует их достоинства и не позволяет им конкурировать с классической шихтованной конструкцией магнитопровода.*

### ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных элементов электроэнергетики и электротехники являются силовые трехфазные трансформаторы. От их характеристик и параметров зависят качество и эффективность энергоснабжения, а также технико-экономические показатели электротехнических устройств и установок.

Особенностью работы силовых трехфазных трансформаторов является циклическое изменение уровня их нагрузки в течение суток. Максимальная нагрузка наблюдается днем, минимальная – ночью. В ночное время при малой нагрузке трансформаторов потери холостого хода (ХХ) становятся преобладающими и являются одной из важнейших характеристик трансформаторов.

Потери ХХ определяются конфигурацией и материалами магнитопровода трансформаторов. В современных условиях удорожания электроэнергии задача снижения потерь ХХ, повышения коэффициента полезного действия (КПД), снижение стоимости и уменьшение габаритов трансформатора является актуальной задачей.

Можно выделить три основных типа магнитопроводов, используемых при построении современных силовых трехфазных трансформаторов: шихтованные, витые и порошковые.

Применение порошковых магнитопроводов пока ограничено их высокой стоимостью, малым сортаментом и низкой магнитной индукцией – до 1 Тл [1]. Пока такие типы магнитопроводов применяют для построения специальных трансформаторов.

Все более широкое применение при изготовлении силовых трехфазных трансформаторов малой и средней мощности находят витые магнитопроводы. Их конструкции развиваются наиболее быстрыми темпами. Исследование свойств и параметров различных конфигураций витых магнитопроводов является темой отдельной статьи.

В настоящее время наиболее массовыми остаются трехфазные силовые трансформаторы с шихтованными магнитопроводами. Эти трансформаторы перекрывают весь диапазон мощностей и напряжений: от малых до больших.

Целью статьи является анализ современных конструкций шихтованных магнитопроводов трехфазных

трансформаторов для выявления среди них наиболее технологичных и с лучшими технико-экономическими показателями.

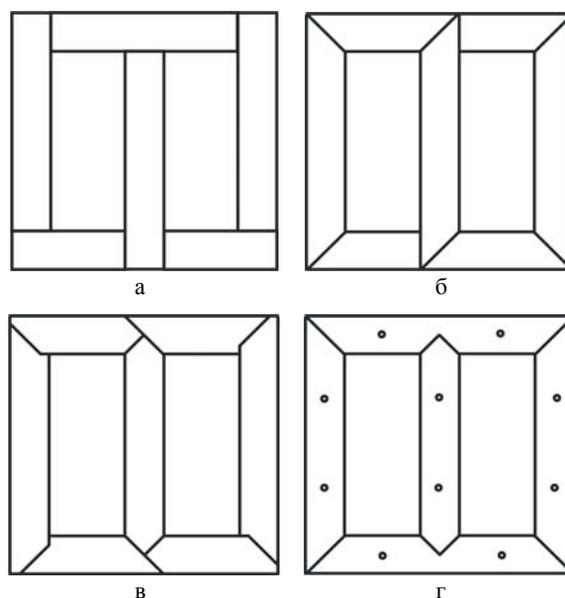


Рис. 1. Разновидности шихтованных магнитопроводов трехфазных трансформаторов [2]

Таблица 1  
Особенности конструкций магнитопроводов на рис. 1, а-г

Тип магнитопровода на рис. 1	Количество пластин/типоразмеров		
	в одном слое	в стречнях	в ярмах
а	6/3	3/1	3/2
б	7/4	3/2	4/2
в	7/4	3/2	4/2
г	5/3	3/2	2/1

Следует выделить три основных конструкции шихтованных магнитопроводов трехфазных трансформаторов: BUTT-LAP (классический шихтованный с прямым резом стыка), 1/2 MITRE CORE, MITRED CORE, а также MULTI (SINGLE) STEP-LAP CORE, (см. рис. 1, а-г соответственно) [2, 3]. Несмотря на наличие при производстве до 4...8 % отходов [2] в последнее время доминирующее положение среди этих

конструкций занимает MULTI-STEP LAP CORE (рис. 1,г). Это связано с более простой сборкой магнитопровода, так как при такой шихтовке используется наименьшее количество пластин электротехнической стали (ЭТС) в слое и наименьшее количество их типоразмеров (см. табл. 1). При сборке стержней необходимо использовать 3 пластины 2-х типоразмеров, а при сборке ярем соответственно 2 и 1. Из-за наличия штампованных отверстий подобная технология позволяет использовать до 5 одинаковых пластин в одном слое, что делает возможным автоматизировать процесс сборки магнитопровода.

Стоимость ЭТС классического шихтованного магнитопровода BUTT-LAP на 6...10 % меньше стоимости магнитопровода MULTI-STEP LAP из-за необходимости компенсации отходов производства при использовании последнего.

### АНАЛИЗ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрим структуру магнитопровода в зоне сочленения стержней с ярами. На рис. 2 схематически представлены виды соединений STEP LAP и BUTT-LAP. При шихтовке BUTT-LAP магнитная индукция в зоне соединений пластин может достигать 160 % номинальной рабочей индукции [3]. Это вызывает глубокое насыщение ЭТС в этих зонах, вызывая значительное увеличение активных потерь в магнитопроводе. При применении MULTI-STEP LAP шихтовки наблюдается меньшее увеличение магнитной индукции – до 120 % [3], а так же снижение активных потерь в магнитопроводе до 13% и уровня шума на 9 дБ [2, 3, 5], что связано с увеличением площади поверхности перехода магнитного потока в зонах сочленения ярем и стержней.

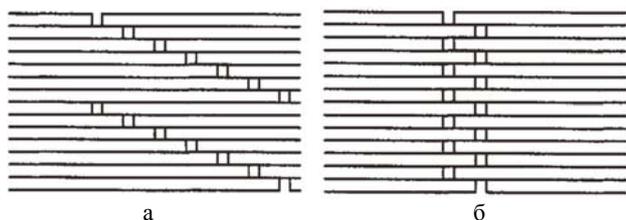


Рис. 2. STEP LAP (а) и традиционно шихтованное (Mitre) соединение BUTT-LAP (б) [4]

На рис. 3 [5] приведен пример распределения магнитного потока при использовании витого магнитопровода с распределенным зазором (wound DG-core [6, 7]) которое в полной мере повторяется при использовании MULTI-STEP LAP магнитопровода. Как видно из рисунка большая часть магнитных силовых линий переходит в соседние слои через боковые поверхности пластин, а меньшая часть – из торца в торец пластин одного слоя. Следовательно, магнитное сопротивление торцов пластин у зазора между пластинами в одном слое больше чем магнитное сопротивление между параллельными пластинами.

Следует отметить, что рис. 3 не совсем точно воспроизводит структуру магнитного поля в зоне, примыкающей к стыку. В этой зоне происходит выравнивание магнитной индукции во всех пластинах и

недогруженных магнитным полем пластин (как в левом верхнем и правом нижнем углах рисунка) не возникает. Но этот рисунок показывает, что при шихтовке типа MULTI-STEP LAP магнитный поток, проходящий поперек пластин, составляет 50 % и более от общего потока из-за отсутствия насыщения пластин, что приводит к резкому возрастанию потерь на вихревые токи. Здесь ширина зоны перехода потока значительно больше толщины пластины, а потери от вихревых токов пропорциональны квадрату этой ширины. При соединении BUTT-LAP магнитный поток, проходящий поперек пластин, составляет 20...25 % от общего потока из-за насыщения пластин, в которые частично переходит магнитный поток, что приводит к уменьшению потерь на вихревые токи.

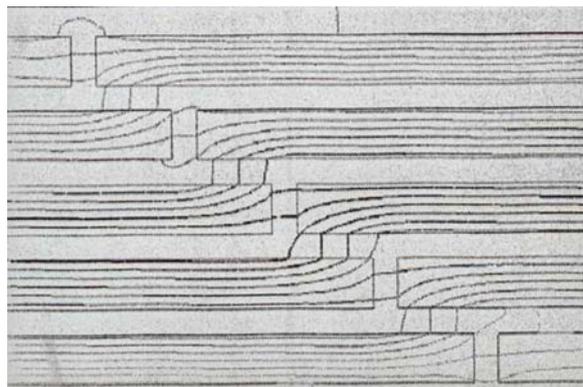


Рис. 3. Распределение магнитного потока в зоне шихтованного стыка STEP LAP пластин магнитопровода [5]

Основная часть магнитного потока переходит из листа в лист поперек направления прокатки, что еще больше увеличивает потери в стали.

Листы анизотропной ЭТС имеют магнитно-структурированный характер, что определяет их различные магнитные свойства в различных направлениях в плоскости листа [8, 9]: в направлении прокатки магнитное сопротивление меньше, поперек прокатки – существенно больше, что неблагоприятно сказывается на прохождении магнитного потока под углами, отличными от направления прокатки.

Косой рез в MULTI-STEP LAP магнитопроводах, с одной стороны, позволяет увеличить поперечное сечение поверхности перехода магнитного потока из стержней в яра, но с другой стороны, с уменьшением ширины пластины значительно увеличиваются удельные активные потери в стали магнитопровода [9]. На рис. 4 показаны изменения удельных потерь при резке-штамповке листов ЭТС различных толщин на полосы различных ширин. При резке-штамповке под углом (MULTI-STEP LAP) наблюдается сходная картина, когда в начале реза угла имеется наибольшее увеличение (до 100 %) удельных потерь – темная область на рис. 5,б, с их уменьшением (до 2...3 %) в продолжение реза.

Иная картина наблюдается при прямом резе листа ЭТС, см. рис. 5,а, где в объеме с деформированной сталью по длине всего реза происходит равномерное увеличение потерь на уровне 3...12 %.

Согласно [9] при резке-штамповке образуется местный наклеп, что также приводит к снижению магнитной проницаемости ЭТС. На рис. 6 представ-

лена зависимость магнитной проницаемости от ширины полосы ЭТС после повторного отжига в течении 2 часов при температуре 800 °С с целью улучшения магнитных свойств. Как видно из рисунка, с уменьшением ширины полосы в значительной мере ухудшаются магнитные свойства ЭТС.

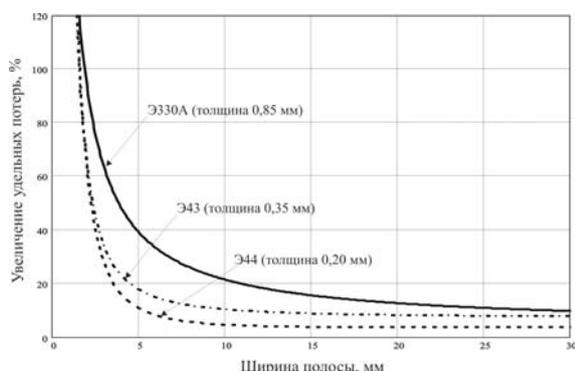


Рис. 4. Изменение удельных потерь при резке ЭТС

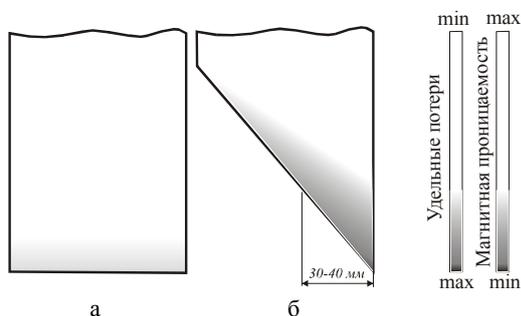


Рис. 5. Изменение удельных потерь и магнитной проницаемости при косом резе и прямом резе полосы ЭТС

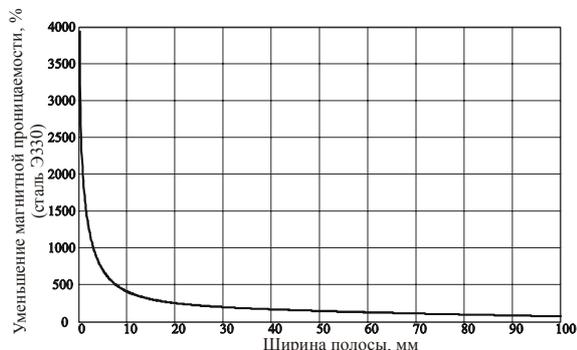


Рис. 6. Зависимость изменения магнитной проницаемости стали Э330 (3413) от ширины полосы при наклепе как результате резки-штамповки [9]

Как правило, предприятия, которые изготавливают пластины ЭТС для магнитопроводов, в послед-



Рис. 8. Внешние виды магнитопровода трансформатора 75 кВ·А типа MULTI STEP LAP-CORE

нее время не делают нормализационного отжига нарубленных пластин, в связи с чем магнитная проницаемость стали существенно снижается [9].

Имеет место обратный эффект применения MULTI-STEP LAP магнитопроводов – вместо уменьшения потерь и улучшения условий перехода магнитного потока из стержней в ярма, происходит увеличение удельных потерь и ухудшение магнитных свойств стали. Отметим также, что объем частей магнитопровода с деформированной сталью при косом резе больше, чем при прямом резе, что также отражается на величине активных потерь в магнитопроводе.

Таким образом, все достижения применения новых видов шихтовок нивелируются побочными эффектами технологического цикла изготовления пластин ЭТС.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для определения эффективности работы различных типов шихтованных магнитопроводов были рассчитаны и построены трехфазные трансформаторы различной мощности с применением разных типов шихтованных магнитопроводов, проведены серии экспериментов с целью изучения их свойств.

При сравнительном анализе свойств магнитопроводов рис. 1,а и рис. 1,г использовались трехфазные трансформаторы одинаковой мощности, размеров и параметров. Мощность трехфазных трансформаторов составляла 75 и 300 кВ·А. На рис. 7 представлены внешние виды трансформаторов с применением MULTI-STEP LAP магнитопроводов (см. рис. 1,г).

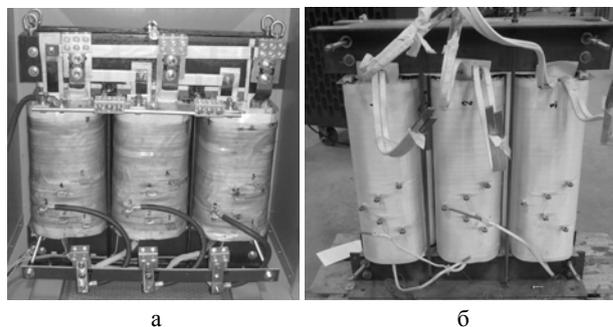


Рис. 7. Трансформаторы с MULTI-STEP LAP CORE магнитопроводами: а – трансформатор 300 кВ·А, 480/208 В; б – трансформатор 75 кВ·А, 480/208 В

На рис. 8 представлены внешние виды углов и ярем трансформатора 75 кВ·А с MULTI-STEP LAP магнитопроводом.

С использованием аналогичного типа шихтовки был построен трансформатор 300 кВ·А. Как видно из рисунка, в каждом слое использовались две одинаковые пластины при этом один ВООК (пластины которые последовательно собраны в определенной очередности с последующим повторением при построении магнитопровода) содержал 10 пластин пяти типоразмеров (пять ступеней, см. рис. 8,в).

Параметры трансформатора 75 кВ·А составляли: первичное напряжение – 480 В; первичная обмотка – 136 витков; соединение первичной обмотки – треугольник; набор пакета магнитопровода – 114 мм; ширина пластин стржня и ярма – 102 мм; высота и ширина окна магнитопровода – 490 и 95 мм; марка ЭТС – 27М4 и 35М6.

Параметры трансформатора 300 кВ·А составляли: первичное напряжение – 480 В; первичная обмотка – 41 виток; соединение первичной обмотки – треугольник; набор пакета магнитопровода – 230 мм; ширина пластин стржня и ярма – 165 мм; высота и ширина окна магнитопровода – 381 и 127 мм; марка ЭТС – 27М4.

Для сравнительной оценки свойств и характеристик магнитопроводов типа MULTI-STEP LAP и стандартного BUTT-LAP проведены серии тестов с использованием трансформаторов 75 и 300 кВ·А. Тесты заключались в подаче на первичные обмотки изменяемого напряжения с последующим измерением активных потерь и тока намагничивания трансформатора, вторичная обмотка разомкнута (опыт XX).

На рис. 9 представлены графики зависимости удельных потерь трансформаторов 75 кВ·А с магнитопроводами типа MULTI-STEP LAP, где применена сталь 27М4 (кривая 1) и стандартными BUTT-LAP (прямые стыки) магнитопроводами с применением сталей 35М6 (кривая 2) и 27М4 (кривая 3).

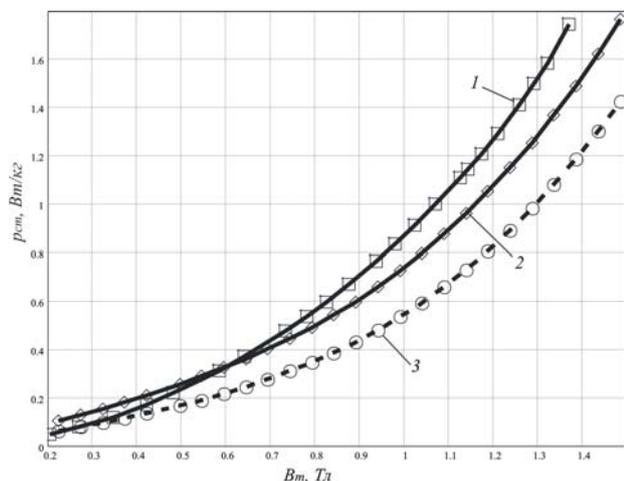


Рис. 9. Удельные активные потери трансформаторов 75 кВ·А

Согласно рис. 9 удельные потери XX в трансформаторе 75 кВ·А с применением MULTI-STEP LAP магнитопровода из ЭТС марки 27М4 больше на 40...50 % удельных потерь в аналоге, где применена стандартная BUTT-LAP конфигурация магнитопровода (см. рис. 1,а) с использованием той же марки ЭТС.

Аналогичная картина наблюдается при сравнении удельных потерь XX трансформаторов 300 кВ·А, но различие составило до 15 %.

Разный уровень удельных потерь XX в трансформаторах 75 и 300 кВ·А связан с различными геометрическими размерами и пропорциями магнитопроводов и, как следствие, различными магнитными условиями в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма (см. заштрихованные области на рис. 10).

Имеет место ситуация, где на пути магнитного потока возникают магнитные "пробки" в виде торцов пластин, с значительно ухудшенной магнитной проницаемостью, что заставляет поток переходить в параллельные пластины и, как следствие, имеем увеличение удельных потерь от вихревых токов.

Исследование зависимости потерь XX трансформаторов от объема деформированной стали и уровня потерь, вызываемых вихревыми токами, является темой для отдельной статьи и здесь не приведено.

Нормализационный отжиг позволяет снизить уровень внутренних напряжений в листах ЭТС уменьшить уровень потерь в стали [9]. Но подобный отжиг ведет к удорожанию стоимости магнитопровода и, как правило, в технологическом процессе подготовки листов ЭТС применяется редко.

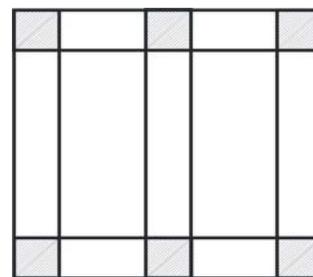


Рис. 10. Области прохождения магнитного потока из стержней в ярма

Следует отметить, что с увеличением геометрических размеров магнитопроводов влияние изменения магнитных свойств пластин магнитопровода в результате рубки-штамповки будет уменьшаться. Это подтверждает разность в удельных потерях в трансформаторах 75 и 300 кВ·А.

В данной статье были проанализированы свойства и параметры сухих трансформаторов малой и средней мощности с напряжением до 1 кВ. В сухих и масляных трансформаторах большой мощности со средним и высоким уровнем напряжения, где используются большие магнитопроводы, недостатки MULTI-STEP LAP конструкции магнитопровода могут нивелироваться, и в полной мере обеспечивать все их достоинства.

Дальнейшие исследования должны быть посвящены анализу свойств и параметров различных конфигураций витых магнитопроводов трехфазных трансформаторов.

## ВЫВОДЫ

Несмотря на увеличение поверхности перехода магнитного потока из стержней в ярма при применении MULTI-STEP LAP магнитопровода трехфазного трансформатора, уровень потерь холостого хода в нем оказывается значительно большим по сравнению с аналогичным трансформатором, изготовленным с BUTT-LAP магнитопроводом. Это обусловлено тем, что при MULTI-STEP LAP шихтовке значительно возрастает

доля магнитного потока, проходящего поперек пластин.

Применение MULTI-STEP LAP магнитопровода в трансформаторах малой и средней мощности приводит к значительному увеличению потерь холостого хода (на 15...50 %), а также сопровождается технологическими отходами стали (5...7 %). Указанные недостатки не компенсируются достоинствами подобного типа магнитопроводов, такими как быстрота и удобство сборки, возможность автоматизации процесса и малого шума при работе трансформатора.

Применение нормализационного отжига листов электротехнической стали может снизить уровень потерь в стальных листах, но ожидать, что эти меры позволят уменьшить дополнительные потери в трансформаторах малой и средней мощности при использовании MULTI-STEP LAP магнитопроводов до уровня BUTT-LAP магнитопроводов не приходится.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.mag-inc.com/products/powder-cores>.
2. <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Multi-Step-Lap-Core-Technical-Final.pdf>.
3. <http://dottoresg.files.wordpress.com/2011/12/4-transformer-engineering-design-and-practice-s-v-kulkarnis-akhaparde2004.pdf>.
4. <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Uncut-Toroidal-Cores-Final.pdf>.
5. [http://www.academia.edu/2165784/impact\\_of\\_the\\_core\\_joint\\_design\\_parameters\\_on\\_transformer\\_losses](http://www.academia.edu/2165784/impact_of_the_core_joint_design_parameters_on_transformer_losses).
6. <http://www.aemcores.com.au/technology/unicore/distributed-gap-dg-cores>.
7. <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Distributed-Gap-Wound-Cores-Final.pdf>.
8. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М. : Высш. школа, 1983 – 463 с.
9. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М. : Энергия, 1974 – 240 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Available at: <http://www.mag-inc.com/products/powder-cores> (accessed 20 August 2013). 2. Available at: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Multi-Step-Lap-Core-Technical-Final.pdf> (accessed 20 August 2013). 3. Available at: <http://dottoresg.files.wordpress.com/2011/12/4-transformer-engineering-design-and-practice-s-v-kulkarnis-akhaparde2004.pdf> (accessed 20 August 2013).

4. Available at: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Uncut-Toroidal-Cores-Final.pdf> (accessed 20 August 2013).
5. Available at: [http://www.academia.edu/2165784/impact\\_of\\_the\\_core\\_joint\\_design\\_parameters\\_on\\_transformer\\_losses](http://www.academia.edu/2165784/impact_of_the_core_joint_design_parameters_on_transformer_losses) (accessed 20 August 2013).
6. Available at: <http://www.aemcores.com.au/technology/unicore/distributed-gap-dg-cores> (accessed 20 August 2013).
7. Available at: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Distributed-Gap-Wound-Cores-Final.pdf> (accessed 20 August 2013).
8. Matveev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 463 p.
9. Druzhinin V.V. *Magnitnye svoystva jelektrotehnicheskoy stali*. Moscow, Jenegija Publ., 1974. 240 p.

*Поступила (received) 20.09.2013*

Levin Michael I.<sup>1</sup>, P. Engineer, Vice President,  
Пентегов Игорь Владимирович<sup>2</sup>, д.т.н., проф., в.н.с.,  
Рымар Сергей Владимирович<sup>2</sup>, д.т.н., с.н.с., в.н.с.,  
Lavreniuk Andrii V.<sup>1</sup>, Ph. D., R&D engineer,

<sup>1</sup> Mirus International Inc.,  
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6,  
phone (905) 4941120, e-mail: michael@mirusinternational.com,  
andrii@mirusinternational.com.

<sup>2</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,  
отдел электротермии,  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11,  
тел/phone +38 044 2061388, e-mail: magn@i.com.ua,  
elmag@paton.kiev.ua

M.I. Levin<sup>1</sup>, I.V. Pentegov<sup>2</sup>, S.V. Ryamar<sup>2</sup>, A.V. Lavreniuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mirus International Inc.,  
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6

<sup>2</sup> The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy  
of Sciences of Ukraine  
11, Bozhenko Street, Kiev, 03150, Ukraine

#### **Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs.**

Analysis and research into properties and parameters of different-type laminated magnetic cores of three-phase power transformers are conducted. Most of new laminated magnetic core designs are found to have significant shortcomings resulted from design and technological features of their manufacturing. These shortcomings cause increase in ohmic loss in the magnetic core, which eliminates advantages of the new core configurations and makes them uncompetitive as compared with the classical laminated magnetic core design.

**Key words – laminated magnetic core designs, three-phase power transformer, ohmic loss, efficiency.**