

А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, Д.Л. Кошкін, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов

## Технічні рішення щодо зниження втрат в магнітопроводах і матеріаломісткості трифазного трансформаторно-реакторного обладнання

*Розглянуто стан розвитку трансформаторобудування. Визначена недостатня ефективність застосування відомих способів зниження втрат у магнітопроводах для задоволення нових вимог енергоресурсозбереження. Показана можливість удосконалення і уніфікації трифазних трансформаторів та реакторів на основі комбінації анізотропної, ізотропної і аморфної сталей, багатограничних геометричних конфігурацій контурів та зміни положень в просторі шарів сталі, а також елементів планарних і просторових шихтованих, витих та комбінованих навито-пластинчастих магнітопроводів. Бібл. 29, рис. 8.*

**Ключові слова:** трифазний трансформатор, реактор, шихтований витий магнітопровід, трансформаторобудування.

**Постановка проблеми.** Збільшення вартості енергії і необхідність подальшого енергоресурсозбереження призводять до зростання вимог і регламентування підвищення коефіцієнтів корисної дії трансформаторів. Зокрема норми НД 428 і НД 538 для масляних і сухих трансформаторів замінені більш вимогливими до зниження втрат Європейським стандартом EN 50464-1 і міжнародним стандартом ІЕС 60034-30. Необхідне суттєве зниження втрат неробочого стану в першу чергу найбільш масового діапазону виготовлення силових розподільчих трифазних трансформаторів (ТТ) потужністю 25-2500 кВ·А і напругою 6-10 кВ. Крім основного внеску в загальні втрати енергосистем вказаними ТТ додатково на енергоефективність енергопостачання впливають втрати в магнітопроводах трифазних реакторів (ТР) аналогічного діапазону потужності. В зв'язку з цим зниження втрат в магнітопроводах ТТ і ТР I – III габаритів являє важливу актуальну задачу [1-4].

**Аналіз останніх досліджень.** Протягом більше 20 років в працях з аналізом розвитку трансформаторно-реакторного обладнання до інноваційних відносять конструкції, що удосконалені на основі досягнень електромагнітознавства. Основні інновації зводяться до розробки «сухих» трансформаторів з «капсульованими» і «кабельними» обмотками [5, 6]. Також використовуються аморфні електротехнічні сталі (ЕТС), надпровідні обмотки і криогенна техніка [7, 8]. Замість токсичного масла для охолодження починається застосування кремнійорганічної рідини і елегазу [9-11]. Крім того, важливим фактором підвищення технічного рівня ТТ і ТР є використання при їх проектуванні методів оптимізації [12, 13].

Біля 50 % втрат при номінальному навантаженні трансформаторів припадає на втрати неробочого ходу. Витрати на їх відшкодування багатократно перевищують витрати втрат короткого замикання. У зв'язку з реальним неповним середнім навантаженням трансформаторів, зниження втрат неробочого ходу є першочерговим завданням.

В минулі десятиріччя втрати в магнітопроводах знижені за рахунок використання ЕТС з покращеними питомими характеристиками. Освоєно виробництво холоднокатаних анізотропних і аморфних ЕТС. В цілому забезпечення вимог нових стандартів досягається зниженням електромагнітних навантажень або застосуванням стрічкової аморфної ЕТС, що передбачає збільшення матеріалоемності (в аморфній і анізотропній ЕТС індукції насичення складають відповідно до 1,6 Тл і вище 2 Тл). Крім того, коефіцієнт заповнення аморфної ЕТС перерізу стрижня складає 0,8-0,85 у порівнянні з аналогічним коефіцієнтом 0,96-0,97 при використанні кристалєвої ЕТС. Створюються ТТ із композитними обмотками і «високоте-

мпературною» надпровідністю [8, 9, 14]. Однак у розподільчих ТТ основного діапазону потужності з технологіями замкнених систем високотемпературного криогенного охолодження не має переваг над звичайними ТТ, що обумовлено складністю криогенної конструктивної частини. Виникає необхідність заохолодження при вводі в експлуатацію і повертання надпровідності після захисного відключення.

В цілому «аморфні» і «надпровідні» ТТ відрізняються підвищеною вартістю. Крихкість аморфної ЕТС і надпровідних композитних «високотемпературних» обмоток виключає їх застосування в транспортних і інших спеціальних ТТ.

Існують методики комплексної оцінки технічного стану функціонуючих трансформаторів і рекомендації до їх подальшого застосування [15]. Однак за експлуатацію працездатних трансформаторів, що не задовольняють вище наведеним стандартам, передбачені штрафні санкції.

Структурно-конструктивну основу ТТ і ТР складають шихтовані та виті магнітопроводи. Текстура анізотропної ЕТС утворює багатократне зростання втрат в зонах повертання магнітного потоку відносно напрямку прокату шарів шихтованого магнітопроводу. Об'єми цих зон зменшуються використанням косих стиків в кутах і в дворамних (розділених за шириною на секції) магнітопроводах [16, 17]. Створене складне обладнання формування косих стиків зі зміною розмірів і малим зсувом стиків суміжних шарів при складанні магнітопроводів (технології Step-lap, Maly step-lap) [4]. Зсув досягається застосуванням відхідної конфігурації менших боків пластин (рис. 1,а) або зменшенням площ косих стиків і формуванням кутових виступів «вусів» (рис. 1,б), що фактично є прихованими відходами.

Згідно [18] косі стики не є ефективним рішенням удосконалення шихтованих магнітопроводів ТТ I-II габаритів. Також підвищення втрат готових планарних шихтованих магнітопроводів відносно питомих втрат анізотропної ЕТС вздовж прокату досягає 37-58 % незалежно від форми стиків. Це є відомим проблемним питанням сучасних ТТ (ТР).

Виробництво магнітопроводів з шихтуванням пакетів доповнюється технологіями навивки стрічки (рулону) ЕТС. Такі технології застосовуються для виготовлення секцій (контурів) триконтурних суцільних та стикових витих і комбінованих магнітопроводів [9, 16, 19-21]. Виготовлення витих трифазних трисекційних планарних і просторових магнітопроводів зростає в зв'язку з розширенням використання аморфної ЕТС [19, 20]. Останнім часом виті розрізні стикові магнітопроводи витісняються аналогами з формуванням охоплюючих шарів розділенням і виги-

ном ділянок стрічки ЕТС. Утворюються умовно косі сполучення частин магнітопроводів при малому зсуві стиків суміжних шарів. Досягається зниження стикових втрат і струму намагнічування (Unicore – магнітопроводи) [20]. Однак відсутність магнітного зв'язку витих секцій обумовлює векторне складання дії в стрижневих ділянках секційних магнітних потоків. Наслідком магнітної відокремленості секцій є треті гармоніки вказаних потоків і додаткові 30-35 % втрати, які не залежать від текстури та марки ЕТС. Це є іншим відомим проблемним питанням трансформаторно-реакторного обладнання.

На основі викладеного вище, задача зниження втрат неробочого ходу і втрат в магнітопроводах ТТ і ТР без збільшення їх масовартістних показників є складною і поки не вирішеною.

**Мета роботи** – зниження втрат магнітопроводів ТТ і ТР при зниженні їх матеріаломісткості.

**Метод та результати дослідження.** Подані в [1-11] як нові розробки електромагнітні системи (ЕМС) ТТ і ТР виконані в незмінних протягом більш століття технічних рішеннях магнітопроводів. Ці розробки в структурно-конструктивному сенсі досягли певної межі розвитку. Тенденції конструктивно-технологічної інерційності електромеханічної інженерії зберігаються також останнім часом. Подальше удосконалення ТТ і ТР із шихтованими і витими магнітопроводами можливо методами їх структурно-геометричних перетворень і застосування комбінацій марок ЕТС [18, 22, 23].

Зовнішній «традиційний» прямокутний контур планарного шихтованого магнітопроводу [24-26] утворює значну нерівномірність розподілу індукції в межах 0,01-2,1 Тл в кутах (рис. 1,с). Зовнішні ділянки кутів висотою  $h_c$  (рис. 1,а,б) недовантажені і практично є некорисним ваговим додатком магнітопроводу.

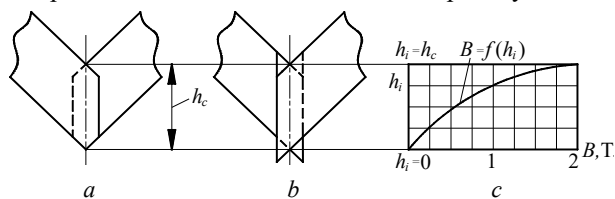


Рис. 1. Схеми варіантів структур пластин стрижня і яра при двошаровому (а) і косому (б) розділенні смуги сталі і залежність розподілу магнітної індукції (с) від висоти куткової зони шихтованого прямокутного магнітопроводу

До нетрадиційних пропозицій зниження втрат відносяться магнітопроводи з комбінацією марок ЕТС. Для зменшення втрат зниженням нерівномірності розподілу магнітного поля в поперечному перерізі і кутах зовнішню частину дворамного шихтованого магнітопроводу пропонується виконувати з покращеними магнітними властивостями відносно внутрішньої частини [27].

Інші пропозиції удосконалення планарного шихтованого магнітопроводу являють варіанти з комбінацією ізогнотропної і анізотропної ЕТС. В магнітопроводі з прямими стиками (рис. 2,а,б) комбінація вказаних ЕТС чергується в суміжних шарах [28]. Кутіві зони містять тільки ізогнотропну ЕТС, що повністю усуває суттєві додаткові втрати кутіві зон. Однак приблизно половина кожного з варіантів комбінованого магнітопроводу [28] містить ізогнотропну ЕТС з підвищеними питомими втратами, що зменшує ефективність вказаної інновації.

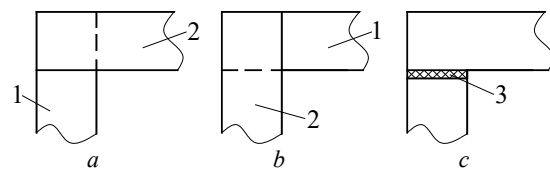


Рис. 2. Схеми варіантів кутіві зон планарного шихтованого магнітопроводу з прямими стиками суміжних шарів трансформатора (а, б) і магнітопроводу реактора (с): 1 – анізотропна сталь; 2 – ізогнотропна сталь; 3 – ізоляційна прокладка

Загальним недоліком традиційних будов ТТ і ТР є розуніфікація внутрішніх структур, тобто сполучень стрижневих і яремних ділянок планарних магнітопроводів. При загальній ідентичності варіантів зовнішньої конфігурації, магнітопроводи ТТ шихтовані зі зсувом косих (рис. 1,а,б) або прямих (рис. 2,а,б) стиків, а магнітопроводи ТР містять конструктивні проміжки між стрижнями з ізоляційними прокладками (рис. 2,с).

Подальший розвиток пропозиції нетрадиційних комбінацій елементів шихтованого магнітопроводу являє установка пластин анізотропної ЕТС в зонах ортогональної зміни напрямку потоку відносно текстури. Застосовуються пластини ізогнотропної ЕТС шевронної форми з протилежними боками різної ширини. В бокових кутах планарного магнітопроводу ці пластини встановлюються в суміжних шарах з протилежним напрямком. В протилежних середніх кутах (Т-подібних ділянках) шевронні пластини встановлюються з ортогональним положенням середніх кутів (рис. 3,а). Шевронні пластини анізотропної ЕТС бокових ділянок для зниження нерівномірності розподілу поля можуть бути виконані із закругленням осьових кутів. Радіус закруглення відповідає ізоляційному проміжку  $h_i$  між магнітопроводом і обмоткою (рис. 3,б).

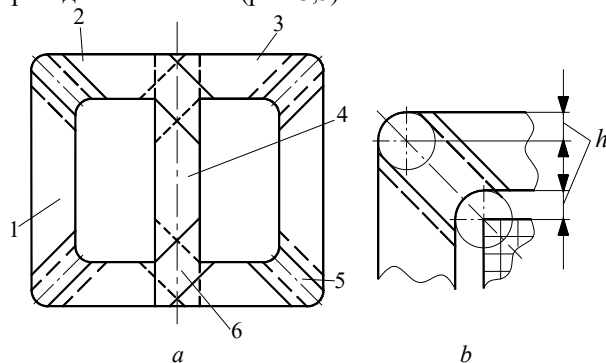


Рис. 3. Схема (а) трифазного з закругленими вершинами кутів (б) магнітопроводу з пластинами 1-4 анізотропної і пластинами 5, 6 ізогнотропної електротехнічних сталей

Нероз'ємне з'єднання анізотропних і ізогнотропних ділянок шевронних пластин в стиках зварюванням знижує струм і втрати неробочого ходу. Вилучення значного ускладнення виробництва магнітопроводів із з'єднанням стиків ізогнотропної і анізотропної ЕТС можливо інтегральним зварюванням і поперечним розділенням смугових заготовок.

Заготовки тандему ЕТС для поперечного розділу на комбіновані пластини (рис. 4) утворюються суміщенням і з'єднанням за лініями стиків смуг анізотропної (рис. 4,а) і ізогнотропної (рис. 4,б) ЕТС. До фрагменту (фрагментів) смуги анізотропної ЕТС можна приварити один, два або декілька фрагментів смуг

ізотропної ЕТС. Перед з'єднанням фрагментів анізотропні компоненти розташовуються з напрямком текстури, яка паралельна лініям розділення (рис. 4,с). Розділенні ділянки фрагментів з двома або декількома швами розрізаються під заданими кутами на пластини (рис. 4,д,е) з комбінацією ЕТС [29]. Фрагменти можуть з'єднуватися одним із способів зварювання (лазерне, електронно-променеве, дифузійне тощо). Визначення способу і процесу такого зварювання є окремою дослідницькою задачею.

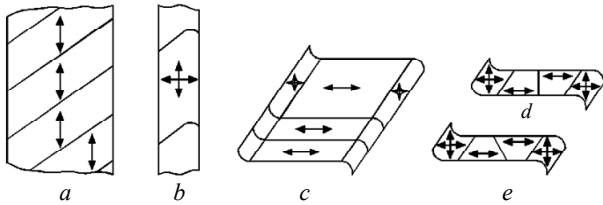


Рис. 4. Принципові схеми розкрою і з'єднання компонент комбінованого магнітопроводу: поперечні розділення пакету анізотропної ( $\leftarrow\rightarrow$ ) (а) і ізотропної ( $\leftarrow\rightarrow$ ) (б) ЕТС на фрагменти; зварювання фрагментів за лініями стиків в заготовку і її розділення на ділянки (с); розділення ділянок фрагментів на комбіновані пластини (д, е)

Один з напрямків структурно-геометричних перетворень статичних ЕМС є заміна традиційних прямокутних і кругових утворюючих контурів активних елементів на нетрадиційні, зокрема восьми і шестигранні контури [22, 23, 29]. Крім пропозицій конструкцій і способів (рис. 3, 4), зменшення маси ізотропних компонент відносно аналогів [27, 28] при зниженні загальної маси і втрат можливо за рахунок заміни прямокутного зовнішнього контуру планарного магнітопроводу на восьмигранний. Стрижневі і яремні ділянки (рис. 5,а) утворюються пластинами анізотропної ЕТС трапецієвидної форми.

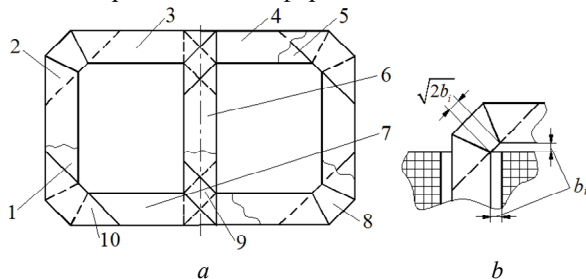


Рис. 5. Схеми конструкції (а) і бокової кутової зони (б) планарного стрижневого магнітопроводу зниженої маси з пластинами 1-7 анізотропної і пластинами 8-10 ізотропної сталей

Трапецієвидні пластини суміжних шарів відрізняються довжинами та кутами. Короткі основи довгих пластин дорівнюють довгим основам коротких пластин і ці основи розташовані протилежно. Боки анізотропних пластин сполучаються з пластинами ізотропної ЕТС, що розташовані в бокових кутах (рис. 5,а). Таким чином утворюється восьмигранний зовнішній контур магнітопроводу. При цьому підвищується рівномірність розподілу поля і вилучається невикористана маса кутових зон (рис. 5,б). Середні кутові (Т-подібні) ділянки розділені протилежно розташованими в середніх шарах меншими та більшими боками паралелограмних пластин ізотропної ЕТС. На вісі центральної стрижневої частини магнітопроводу (рис. 5,а) встановлюються трапецієвидні або паралелограмні пластини анізотропної ЕТС. В кутах при відсутності ізоляційного про-

міжку  $b_t$  (рис. 5,б) також можуть встановлюватися між трапецієвидними пластинами трикутні пластини.

Усунути втрати від третіх контурних гармонік магнітного поля трифазного планарного трисекційного магнітопроводу з витими компонентами можливо в структурі з ортогональним положенням шарів середнього і бокових елементів (рис. 6,а). Бокові С-подібні елементи виконуються розрізанням витой заготовки або з вигнутих смуг анізотропної ЕТС. Середній елемент для вилучення додаткових втрат ортогонального повертання потоку і зменшення додаткових втрат фазної асиметрії може бути виконаний з кращих марок ізотропної ЕТС. Поперечним розділом смуги (рис. 6,б) можливо формування косих стиків середнього і бокових елементів.

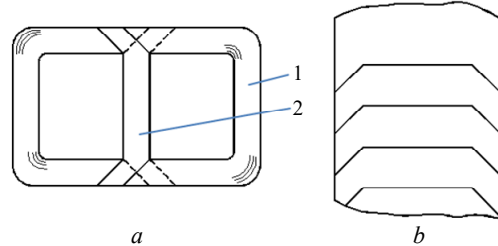


Рис. 6. Конструктивна схема (а) планарного стикового магнітопроводу з витими боковими 1 і шихтованим 2 середнім елементами і розділення смуги (б) сталі на пластини середнього елемента

Секціонування магнітопроводу за шириною (рис. 6,а) додатково до косих сполучень знижує магнітний опір стиків перевертанням секцій в кожній парі суміжних середніх і бокових елементів.

Крім комбінованого стрічково-пластинчастого можливо виготовлення витого варіанту магнітопроводу схеми (рис. 6,а). Два однакових витих магнітопроводу можливо скласти з ділянок двох витих розрізаних заготовок. Заготовки при однакових висотах  $h_m$  і ідентичних поперечних перерізах відрізняються довжинами  $l_1$  і  $l_2$  внутрішніх прямокутних контурів:

$$l_1 = h_m + 2b_v + 2b_t; \quad l_2 = 2b_v + b_t,$$

де  $b_v$  і  $b_t$  – ширина обмоткового вікна і товщина шару технологічного відходу ЕТС (ріжучого диску).

Обмоткові котушки намотуються на ізоляційні каркаси, що охоплюють бокові і середній елементи магнітопроводу (рис. 6,а). Такі каркаси складають несучу базу ЕМС з крихкою аморфною ЕТС. Взаємно ортогональні шари ЕТС стикових сполучень середньої і бокових ділянок магнітопроводу ТТ схем (рис. 6,а) повинні ізолюватися нанесенням тонкого міцного термостійкого покриття.

Іншим варіантом технічного рішення, що містить С-подібні частини витих заготовок, є просторова конструкція ЕМС Т-подібної форми (рис. 7,а). Для збігу напрямків шарів ЕТС за умови одноплщинності стиків одна з С-подібних ділянок магнітопроводу сполучається з двома іншими з розташуванням бокових поверхонь в ортогональних площинах (рис. 7,б).

Втрати від третіх гармонік контурних потоків також відсутні у варіантах згаданої вище просторової ЕМС з загальним магнітним зв'язком стрижнів і яремних частин стикового магнітопроводу при з'єднанні первинної обмотки трикутником. Однак такі ЕМС виконані в традиційних кругових утворюючих контурах обмоткових котушок і стрижнів. Кругові контури стрижнів вказаних варіантів заповнюються, при наявності центральних технологічних отворів, концентричними

витками ізотропної або евольвентно вигнутими листами анізотропної ЕТС. Також застосовуються стрижні, що складені з пакетів ЕТС різної ширини (рис. 8,а). Вказані різновиди перерізів і структур стрижнів заповнюють контурні кола на 80-90 % і встановлюються між витими яремно-кутовими торцевими частинами з трикутними внутрішніми контурами.

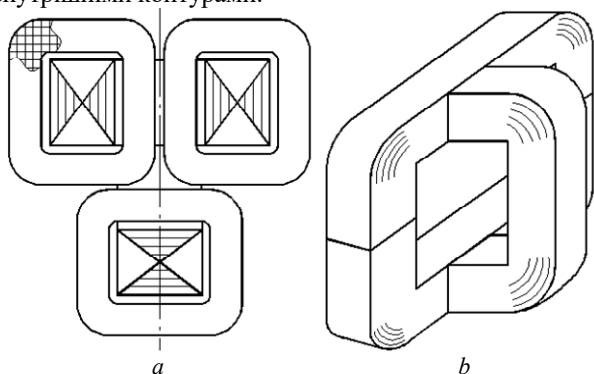


Рис. 7. Конструктивна схема (а) і магнітопровід (b) просторової ЕМС з Т-подібним ортогональним розташуванням витих ділянок

Вказані кругові і трикутні контури частин магнітопроводу негативно впливають на використання активного об'єму ЕМС та підвищують втрати в ЕТС ТТ (ТР) з магнітопроводом (рис. 8,а). Виникає значна нерівномірність розподілу магнітного поля за радіальною довжиною  $l_a$  ярем прямокутного перерізу з нульовими значеннями індукції на внутрішньому і зовнішньому виткових шарах ЕТС. Це підвищує індукцію в середніх частинах ярем і кутів і викликає підвищення втрат, що враховується в залежності від індукції відповідними коефіцієнтами. При цьому підвищення втрат при застосуванні анізотропної ЕТС також обумовлено незбігом напрямків силових ліній поля в кутах напруму текстури витих частин. Тому яремно-кутові і стрижневі частини комбінованого стикового навито-пластинчастого магнітопроводу доцільно виконувати з ізотропної або аморфної та анізотропної ЕТС.

Удосконалення ЕМС з стрічково/рулонно-пластинчастим магнітопроводом можливо заміною кругових і трикутних контурів частин магнітопроводу на шестигранні (рис. 8,б,с). Названі перетворення призводять до зниження нерівномірності поля в радіальному напрямку ярем, тобто вздовж довжини  $l_a$  (рис. 8,а,б). При заданому середньому значенні амплітуди магнітної індукції ярем  $B_{am}$  розподіл 1 змінюється до розподілу 2 (рис. 8,д). Таким чином зменшуються індукції в основних середніх об'ємах ЕТС ярем і кутів і зменшуються втрати.

Ідентичні прямокутні пластини ЕТС стрижнів (рис. 8,б) практично повністю заповнюють ЕТС шестигранні контури і заповнюють описане коло з коефіцієнтом 0,826. В зв'язку з співвідношенням довжини кола радіусу  $r_R$  (рис. 8,б) і вписаного шестигранника 1.047, заміною кругових конфігурацій витків на шестигранні досягається деяке зниження маси і втрат обмотки при заданій площі перерізу стрижня. Наявність центральних отворів шестигранних стрижнів знижує масу і втрати магнітопроводу застосуванням двоконтурних яремно-кутових частин і структури стрижнів з ідентичних пластин ЕТС (рис. 8,с).

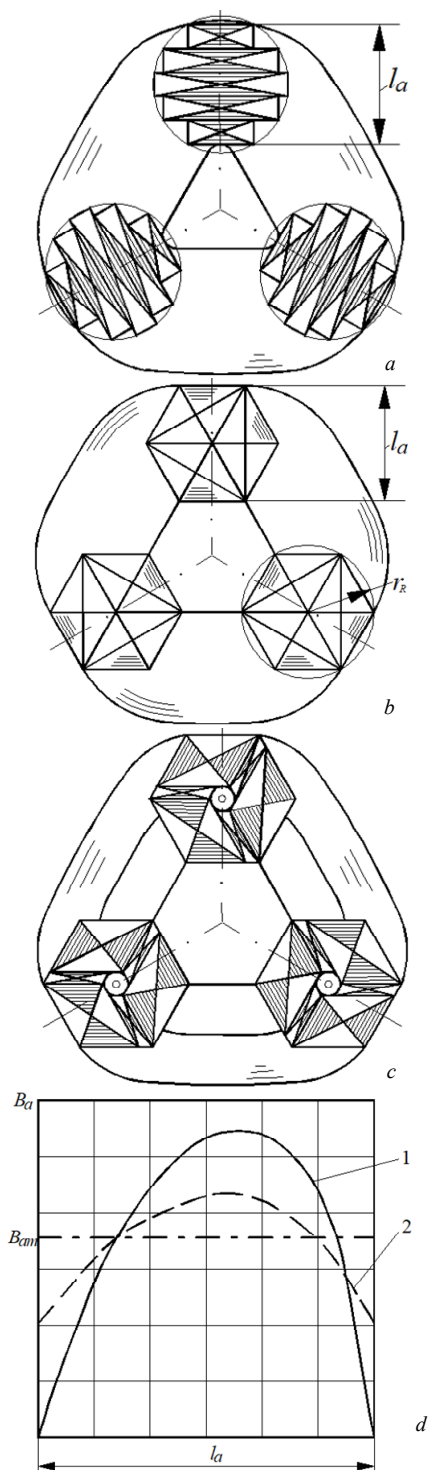


Рис. 8. Конструктивно-геометричні особливості варіантів трифазного стрічково-пластинчастого магнітопроводу з круговими і трикутними (а) та шестигранними (б, с) контурами стрижнів і яремно-кутових частин та варіанти розподілу індукції в ярем (д) з трикутним (1) і шестигранним (2) внутрішніми контурами

Обґрунтований вибір певного технічного рішення з наявних варіантів при новому проєктуванні або доказ переваг вперше створених інновацій потребує рішення задачі структурної або структурно-параметричної оптимізації. Математичні моделі вказаних задач повинні задовольняти умовам інваріантності. Першою є наявність математичних моделей з цільовими функціями універсального виду і порядку складання з однаковим

набором керованих змінних для будь яких відомих і нових пропозицій технічного об'єкту. Другою є відповідність математичних моделей вимогам зіставлення одиниць виміру, тобто результати розрахунків оптимізаційних критеріїв повинні визначатись у безрозмірних або питомих (відносних) одиницях.

Таким умовам відповідає метод універсальних цільових функцій безрозмірних показників технічного рівня і відносних геометричних і електромагнітних керованих змінних [22-24]. При застосуванні вказаного методу виявлена ідентичність загального виду цільових функцій трансформаторів, реакторів і асинхронних машин [22, 23], що відповідає загальному електромагнітному принципу їх дії. Цільові функції  $k$  – окремих критеріїв оптимізації (маси  $k = 1$ , вартості  $k = 2$ , втрат  $k = 3$ )  $ij$  – варіант ЕМС ТТ і ТР визначаються рівняннями:

$$F_{KTTij} = K_{MK} (\Pi_{TT})^{3/4} \Pi_{KTTij}^*$$

$$F_{KTRij} = K_{MK} (\Pi_{TR})^{3/4} \Pi_{KTRij}^*$$

де  $K_{MK}$  – складова питомих характеристик одного з активних матеріалів ЕМС;  $\Pi_{TT(TR)}$  і  $\Pi_{KTT(TR)ij}^*$  – показник вихідних даних і електромагнітних навантажень та безрозмірна оптимізаційна складова  $ij$  – варіанту ЕМС ТТ (ТР), що відповідає  $k$  – критерію оптимізації.

Складові  $\Pi_{KTT(TR)ij}^*$  є нелінійними рівняннями з відносними керованими змінними. Їх екстремуми  $\Pi_{TT(TR)}$  уявляють показники технічного рівня  $ij$  – варіантів ЕМС [22-24].

При застосуванні названого методу виявлена ідентичність показників технічного рівня і відповідно оптимальних геометричних співвідношень однакових конструкцій і структур ТТ і ТР [22]. Це надає можливість виготовлення на основі однакових витих або комбінованих стикових магнітопроводів схем (рис. 6,а; рис. 8,б,с) уніфікованих оптимізованих ЕМС ТТ і ТР, що відрізняються числом виткових котушок в обмотковому вікні. Подібна уніфікація призведе до значного ефекту при виготовленні ТТ і ТР I-III габаритів.

#### Висновки.

1. Застосовані в шихтованих текстурованих магнітопроводах косі і двоконтурні (рамні) сполучення відповідно кутових, стрижневих і яремних ділянок не забезпечують суттєвого зниження додаткових втрат неробочого ходу традиційних варіантів трифазних трансформаторів (ТТ) і реакторів (ТР).

2. Використання замість анізотропної стрічкової аморфної електротехнічної сталі (ЕТС) лімітовано технологічною межею потужності ТТ (ТР) з витими магнітопроводами і суттєво погіршує їх масовартісні показники. При цьому питання зниження значних додаткових втрат витих трифазних триконтурних магнітопроводів залишається проблемним.

3. Удосконалення ТТ (ТР) з шихтованими текстурованими планарними магнітопроводами забезпечується розташуванням в зонах зміни напрямку потоку фрагментів ізотропної ЕТС при закругленні прямих кутів або восьмигранній конфігурації зовнішніх контурів.

4. Усунення втрат від третіх гармонік контурних потоків досягається заміною витих трифазних магнітопроводів з відокремленими контурами на планарні і просторові стикові магнітопроводи з магнітним зв'язком стрижневих і яремно-кутових частин.

5. На основі ідентичності оптимальних геометричних співвідношень однакових загальних структур ТТ і ТР уявляється доцільною розробка їх уніфікованих електромагнітних систем з варіантами стикових планарних та просторових витих і стрічково-пластинчастих магнітопроводів, що відрізняються відповідно ортогональним розташуванням шарів ЕТС або положенням в просторі середньої і бокових ділянок та шестигранними конфігураціями контурів стрижнів і внутрішніх контурів ярем.

6. Побудова просторових стрічково-пластинчастих стикових магнітопроводів повинна базуватися на комбінації марок ізотропної і анізотропної ЕТС в яремно-кутових частинах і стрижнях.

**Конфлікт інтересів.** Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Targosz R., Topalis F.V. Energy efficiency of distribution transformers in Europe. *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/EPOU.2007.4424121>.
2. De Almeida A., Santos B., Martins F. Energy-efficient distribution transformers in Europe: impact of Ecodesign regulation. *Energy Efficiency*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 401-424. doi: <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9365-z>.
3. Charalampopoulos C., Psomopoulos C.S., Ioannidis G.Ch., Kaminaris S.D. Implementing the EcoDesign Directive in distribution transformers: First impacts review. *AIMS Energy*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 113-124. doi: <https://doi.org/10.3934/energy.2017.1.113>.
4. Ilo A. Behavior of transformer cores with multistep-lap joints. *IEEE Power Engineering Review*, 2002, vol. 22, no. 3, pp. 43-47. doi: <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.989193>.
5. Yuen D.C.M., Choi V., Liu Zhi Gao, Jun Han. The first 110 kV /35 kV - 31.5 MVA cast resin transformer. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*, 2004, vol. 2, pp. 763-767. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348500>.
6. Gao Yingna, Wang Shishan, Gao Hong. A new type of dry power transformer based on XLPE cable winding. *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, vol. 3, pp. 1771-1774. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202864>.
7. Najafi A., Iskender I. Comparison of core loss and magnetic flux distribution in amorphous and silicon steel core transformers. *Electrical Engineering*, 2018, vol. 100, no. 2, pp. 1125-1131. doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0574-7>.
8. Hu D., Li Z., Hong Z., Jin Z. Development of a single-phase 330kVA HTS transformer using GdBCO tapes. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 2017, vol. 539, pp. 8-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2017.06.002>.
9. Пуйло Г.В., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2008, № 2, С. 48-52.
10. Vani A., Sree Rama Chandra Murthy P. An automated tool for analyzing dissolved gases in power transformers and SF6 in switch gears using Artificial Intelligence approaches. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 262-274.
11. Ozgonenel O., Font A., Ilhan S. SF6 gaz yalitimli dagitim transformatorünün elektrostatik alan analizi. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering, ELECO 2016*, pp. 359-362. (Tur).
12. Blume S., Biela J. Optimal Transformer Design for Ultraprecise Solid State Modulators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 10, pp. 2691-2700. doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2280429>.
13. Chen B., Liang X., Wan N. Design Methodology for Inductor-Integrated Litz-Wired High-Power Medium-Frequency Transformer With the Nanocrystalline Core Material for Isolated DC-Link Stage of Solid-State Transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, no. 11, pp. 11557-11573. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2987944>.

14. Пуйло Г.В., Насыпанная Е.П. Эффективность применения обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью в силовых трансформаторах. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2014, № 14 (90), С. 43-52.

15. Bardyk E.I., Bolotnyi N.P. Development of fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 3-13. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.01>.

16. Flanagan W.M. *Handbook of transformers design and application*. Boston, Mc Grow Hill, 1993. 232 p.

17. Marketos P., Meydan T. Novel Transformer Core Design Using Consolidated Stacks of Electrical Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 2821-2823. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879139>.

18. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2014, no. 1, pp. 40-44. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2014.1.08>.

19. Kefalas T.D., Kladas A.G. Development of Distribution Transformers Assembled of Composite Wound Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 775-778. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172976>.

20. Hernandez I., Olivares-Galvan J.C., Georgilakis P.S., Cañedo J.M. Core loss and excitation current model for wound core distribution transformers. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014, vol. 24, no. 1, pp. 30-42. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.1687>.

21. Avdieieva O.A., Vakhonina L.V., Sadovoy O.S., Stavinskiy R.A., Tsyganov O.M. Improving the main indicators of transformers with twisted one-piece magnetic cores by changing the technology of circular winding turns formation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 3-7. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.01>.

22. Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Авдеева Е.А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией элементов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2014, № 14 (90), С. 53-60.

23. Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Авдеева Е.А., Пальчиков О.О. Универсальный метод обоснованного выбора технических решений активной части электрических машин и аппаратов. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, 2016, № 11 (1183), С. 70-79.

24. Ставинський А.А., Авдеева О.А., Циганов О.М., Ставинський Р.А., Садовий О.С. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів (масовартистні показники). *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, 2019, № 4 (1329), С. 38-43. doi: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.4.05>.

25. Poveda-Lerma A., Serrano-Callergues G., Riera-Guasp M., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Perez-Cruz J. Lamination effects on a 3D model of the magnetic core of power transformers. *Open Physics*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 997-1003. doi: <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0124>.

26. Magdaleno-Adame S., Kefalas T.D., Garcia-Martinez S., Perez-Rojas C. Electromagnetic finite element analysis of electrical steels combinations in lamination core steps of single-phase distribution transformers. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261585>.

27. Magdaleno-Adame S., Melgoza-Vazquez E., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016, vol. 26, no. 8, pp. 1737-1751. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.2175>.

28. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 20-24. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.04>.

29. Stavinskiy A.A., Tsyganov A.M. Design and technological proposals for improving a single-phase transformer with laminated magnetic core. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 11-17. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.02>.

## REFERENCES

- Targosz R., Topalis F.V. Energy efficiency of distribution transformers in Europe. *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/EPCU.2007.4424121>.
- De Almeida A., Santos B., Martins F. Energy-efficient distribution transformers in Europe: impact of Ecodesign regulation. *Energy Efficiency*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 401-424. doi: <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9365-z>.
- Charalampopoulos C., Psomopoulos C.S., Ioannidis G.Ch., Kaminaris S.D. Implementing the EcoDesign Directive in distribution transformers: First impacts review. *AIMS Energy*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 113-124. doi: <https://doi.org/10.3934/energy.2017.1.113>.
- Ilo A. Behavior of transformer cores with multistep-lap joints. *IEEE Power Engineering Review*, 2002, vol. 22, no. 3, pp. 43-47. doi: <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.989193>.
- Yuen D.C.M., Choi V., Liu Zhi Gao, Jun Han. The first 110 kV /35 kV - 31.5 MVA cast resin transformer. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*, 2004, vol. 2, pp. 763-767. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348500>.
- Gao Yingna, Wang Shishan, Gao Hong. A new type of dry power transformer based on XLPE cable winding. *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, vol. 3, pp. 1771-1774. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202864>.
- Najafi A., Iskender I. Comparison of core loss and magnetic flux distribution in amorphous and silicon steel core transformers. *Electrical Engineering*, 2018, vol. 100, no. 2, pp. 1125-1131. doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0574-7>.
- Hu D., Li Z., Hong Z., Jin Z. Development of a single-phase 330kVA HTS transformer using GdBCO tapes. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 2017, vol. 539, pp. 8-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2017.06.002>.
- Puilo G.V., Kuzmenko I.S., Tongaluk V.V. State-of-the-art trends in distribution transformers production. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2008, no. 2, pp. 48-52. (Rus).
- Vani A., Sree Rama Chandra Murthy P. An automated tool for analyzing dissolved gases in power transformers and SF6 in switch gears using Artificial Intelligence approaches. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 262-274.
- Ozgonenel O., Font A., Ilhan S. SF6 gaz yalitimli dagitim transformatörünün elektrostatik alan analizi. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering, ELECO 2016*, pp. 359-362. (Tur).
- Blume S., Biela J. Optimal Transformer Design for Ultraprecise Solid State Modulators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 10, pp. 2691-2700. doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2280429>.
- Chen B., Liang X., Wan N. Design Methodology for Inductor-Integrated Litz-Wired High-Power Medium-Frequency Transformer With the Nanocrystalline Core Material for Isolated DC-Link Stage of Solid-State Transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, no. 11, pp. 11557-11573. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2987944>.
- Puilo G.V., Nasypannaya E.P. Efficiency of windings with high-temperature superconductivity application in power transformers. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2014, no. 14 (90), pp. 43-52. (Rus).
- Bardyk E.I., Bolotnyi N.P. Development of fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 3-13. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.01>.
- Flanagan W.M. *Handbook of transformers design and application*. Boston, Mc Grow Hill, 1993. 232 p.
- Marketos P., Meydan T. Novel Transformer Core Design Using Consolidated Stacks of Electrical Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 2821-2823. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879139>.
- Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2014, no. 1, pp. 40-44. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2014.1.08>.
- Kefalas T.D., Kladas A.G. Development of Distribution Transformers Assembled of Composite Wound Cores. *IEEE Transactions on*

*Magnetics*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 775-778. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172976>.

20. Hernandez I., Olivares-Galvan J.C., Georgilakis P.S., Cañedo J.M. Core loss and excitation current model for wound core distribution transformers. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014, vol. 24, no. 1, pp. 30-42. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.1687>.

21. Avdieieva O.A., Vakhonina L.V., Sadovoy O.S., Stavinskiy R.A., Tsyganov O.M. Improving the main indicators of transformers with twisted one-piece magnetic cores by changing the technology of circular winding turns formation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 3-7. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.01>.

22. Stavinskiy A.A., Stavinskiy R.A., Avdieieva E.A. The method of comparative analyses of static electromagnetic systems that is different in structure and configuration of elements. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2014, no. 14 (90), pp. 53-60. (Rus).

23. Stavinskiy A.A., Stavinskiy R.A., Avdeeva E.A., Palchikov O.O. A universal method for the justified selection of technical solutions for the active part of electrical machines and devices. *Bulletin of NTU «KhPI» Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 2016, no. 11 (1183), pp. 70-79. (Rus).

24. Stavynskiy A.A., Avdeeva O.A., Tsyganov O.M., Stavynskiy R.A., Sadovy O.S. Comparison of three-phase transformers with rectangular and circular rod contour of planar laminated magnetic cores (mass and cost indicators). *Bulletin of NTU «KhPI» Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 2019, no. 4 (1329), pp. 38-43. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.4.05>.

25. Poveda-Lerma A., Serrano-Callergues G., Riera-Guasp M., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Perez-Cruz J. Lamination effects on a 3D model of the magnetic core of power transformers. *Open Physics*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 997-1003. doi: <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0124>.

26. Magdaleno-Adame S., Kefalas T.D., Garcia-Martinez S., Perez-Rojas C. Electromagnetic finite element analysis of electrical steels combinations in lamination core steps of single-phase distribution transformers. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261585>.

27. Magdaleno-Adame S., Melgoza-Vazquez E., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016, vol. 26, no. 8, pp. 1737-1751. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.2175>.

28. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 20-24. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.04>.

29. Stavinskiy A.A., Tsyganov A.M. Design and technological proposals for improving a single-phase transformer with laminated magnetic core. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 11-17. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.02>.

Надійшла (Received) 04.09.2023

Прийнята (Accepted) 07.11.2023

Опублікована (Published) 02.03.2024

Ставинський Андрій Андрійович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Авдєєва Олена Андріївна<sup>2</sup>, к.т.н.,

Кошкін Дмитро Леонідович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

Ставинський Ростислав Андрійович<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

Циганов Олександр Миколайович<sup>1</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Миколаївський національний аграрний університет,

54020, Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9,

e-mail: andrey.stavynskiy@mnau.edu.ua;

Koshkindl@mnau.edu.ua;

potomkinske@gmail.com (Corresponding Author)

<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова,

54025, Миколаїв, пр. Героїв України, 9,

e-mail: e.avdeeva@ukr.net;

rostyslav.stavynskiy@nuos.edu.ua

A.A. Stavynskiy<sup>1</sup>, O.A. Avdeeva<sup>2</sup>, D.L. Koshkin<sup>1</sup>,

R.A. Stavynskiy<sup>2</sup>, O.M. Tsyganov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mykolayiv National Agrarian University,

9, Georgiya Gongadze Str., Mykolaiv, 54020, Ukraine.

<sup>2</sup> Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

9, Avenue Heroes of Ukraine, Mykolaiv, 54020, Ukraine.

**Technical solutions to reduce losses in magnetic cores and material consumption of three-phase transformer and reactor equipment.**

**Purpose.** The increase in energy costs and the need for further energy saving lead to an increase in requirements for reducing losses in the magnetic cores of transformers and reactors. **Problem.** The improvement of transformer and reactor equipment is traditionally carried out by applying the achievements of electrical materials science and new technologies to traditional designs and structures of electromagnetic systems. The basis of modern transformers is made up of laminated and twisted magnetic cores. The disadvantage of laminated magnetic cores is large additional losses in corner zones due to the texture of anisotropic steel. Disadvantage of twisted three-phase three-contour magnetic cores is large additional losses caused by the lack of magnetic coupling of three separate magnetic flux contours. The disadvantages of combined joint tape-plate magnetic cores are the unsatisfactory use of the active volume and increased losses, which are determined by the uneven distribution of the magnetic field and the negative impact of steel texture in the corner zones of the twisted parts. **Aim.** To determine the possibility of improving three-phase transformers and reactors.

**Methodology.** The improvement is achieved by geometrical and structural transformations of the outer contours and elements of the varieties of magnetic cores. **Results.** The possibility of eliminating additional losses of a planar laminated magnetic core by a combination of anisotropic and isotropic steels at the appropriate location in the yoke-rod and corner sections is determined. With an octagonal outer contour of the combined magnetic core, a reduction in mass is achieved without an increase in losses. The mutually orthogonal position of the steel layers or the elements of the joint twisted and combined three-phase planar and spatial magnetic cores achieves magnetic coupling and elimination of additional losses of individual twisted contour sections. The hexagonal configurations of the inner contours of the twisted yoke-corner parts and the cross-sections of the laminated rods of the variants of the axial spatial joint magnetic core improve the magnetic flux density distribution and reduce the main losses of the yokes, as well as reduce the complexity of manufacturing rods from identical rectangular steel layers. **Originality.** The paper presents constructive and technological proposals and features of varieties of non-traditional planar and spatial, laminated, twisted and combined tape-plate joint magnetic cores, which differ in the combination of anisotropic, isotropic and amorphous steels, as well as the multifaceted geometric shape of contours and the spatial arrangement of elements. Based on the identity of the optimal geometric ratios of the variants of electromagnetic systems of transformers and reactors, with joint planar and spatial twisted and combined and tape-plate magnetic cores, the unification of the structure of transformer and reactor equipment with a capacity of I-III dimensions. References 29, figures 8.

**Key words:** three-phase transformer, reactor, laminated twisted magnet core, transformer construction.

*How to cite this article:*

Stavynskiy A.A., Avdeeva O.A., Koshkin D.L., Stavynskiy R.A., Tsyganov O.M. Technical solutions to reduce losses in magnetic cores and material consumption of three-phase transformer and reactor equipment. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 3-9. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.01>