

Keywords: *submersible pump; frequency-controlled electric drive; hydraulic transport of polypropylene granules; current sensor; pressure sensor; simulation studies; energy efficiency.*

Науковий керівник:

Руденко А.Ю.

*асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет*

УДК 621.314.332

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ В МАГНІТОПРОВОДАХ І МАТЕРІАЛОМІСТКОСТІ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРНО-РЕАКТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ.

Середа Віталій

здобувач вищої освіти спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніки та електромеханіка

Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв, Україна

Анотація: *Обґрунтовано актуальність зниження втрат неробочого ходу у магнітопроводах трифазних трансформаторів (25–2500 кВА, 6–10 кВ) та реакторів у контексті посилених вимог EN 50464-1 та IEC 60034-30. Показано обмеження традиційних підходів (анізотропні сталі з косими стиками Step-lap/Multi-step-lap, аморфні сталі, «капсульовані/кабельні» обмотки) щодо досягнення суттєвого зниження втрат без зростання матеріаломісткості. Запропоновано комплекс рішень: комбінування анізотропної, ізотропної та аморфної ЕТС; шевронні вставки з інтегральним зварюванням; ортогональне взаємне розташування шарів у планарних/просторових стикових магнітопроводах; перехід від прямокутних/кругових до багатограних контурів (восьми- та шестигранних). Доведено, що шестигранні внутрішні контури та восьмигранний зовнішній контур зменшують нерівномірність поля в ярмах, прибирають «мертву» масу кутових зон і знижують втрати; для витих секцій усунення третіх гармонік забезпечується магнітним зв'язком/ортогональністю шарів. Для обґрунтованого вибору варіантів застосовано метод універсальних безрозмірних цільових функцій (маса/вартість/втрати), який уніфікує порівняння ЕМС ТТ/ТР.*

Ключові слова: *трифазний трансформатор; реактор; шихтований/витий магнітопровід; трансформаторобудування; анізотропна/ізотропна/аморфна електротехнічна сталь; step-lap; восьми- та шестигранні контури.*

Зростання вимог до енергоефективності трансформаторів зумовлено переходом від національних норм до EN 50464-1 та IEC 60034-30. Найбільший внесок у втрати системи дають розподільчі ТТ 25–2500 кВА (6–10 кВ), а також

магнітопроводи трифазних реакторів цього ж діапазону; першочерговим є зниження втрат неробочого ходу.

У минулі десятиріччя втрати скорочували за рахунок кращих питомих характеристик ЕТС (холоднокатана анізотропна, аморфна), але це часто вимагало зниження електромагнітних навантажень або переходу на аморфні стрічки зі зниженим коефіцієнтом заповнення (0,80–0,85 проти 0,96–0,97 у кристалічних сталей), а також спричиняло подорожчання і технологічні обмеження [1].

Текстура анізотропної ЕТС зумовлює ріст втрат у зонах повороту потоку; технології *step-lap/multi-step-lap* зменшують їх частково, але підвищення втрат готових планарних магнітопроводів щодо питомих уздовж прокату сягає 37–58 % незалежно від форми стиків, що лишається проблемою для ТТ/ТР малих габаритів.

Для зменшення нерівномірності поля пропонується виконувати зовнішню частину дворамного шихтованого магнітопроводу зі сталі з кращими магнітними властивостями; інший варіант — комбінація шарів ізотропної та анізотропної ЕТС з розміщенням в кутових зонах лише ізотропної сталі для повного усунення кутових додаткових втрат. Ефективність підвищує застосування шевронних пластин та їх нероз'ємне з'єднання (лазерне, електронно-променеве, дифузійне тощо) у комбіновані пластини [2].

Заміна прямокутного зовнішнього контуру планарного магнітопроводу на восьмигранний вилучає невикористану масу кутових зон і вирівнює розподіл поля; конструктивно це реалізується трапецієвидними пластинами анізотропної сталі в стрижнях/ярмах та ізотропними пластинами у бокових кутах.

Для планарних стикових магнітопроводів із витими боковими й шихтованим середнім елементами взаємно ортогональне розташування шарів і/або просторові Т-подібні конструкції забезпечують відсутність третіх гармонік контурних потоків і зниження струму намагнічування; у комбінованих навито-пластинчастих структурах ярмно-кутові та стрижневі частини доцільно виконувати з ізотропної/аморфної та анізотропної ЕТС. Для аморфних шарів потрібні тонкі термостійкі ізоляційні покриття стикових сполучень.

Заміна кругових/трикутних контурів на шестигранні знижує нерівномірність поля вздовж радіальної довжини ярма, зменшує індукції у середніх об'ємах сталі й відповідні втрати; ідентичні прямокутні пластини стрижнів практично повністю заповнюють шестигранні контури (коефіцієнт заповнення описаного кола $\approx 0,826$), що разом із центральними отворами та двоконтурними ярмно-кутовими частинами дає додаткове зниження маси й втрат [3].

Для порівняльного вибору рішень запропоновано метод універсальних безрозмірних цільових функцій за критеріями маси, вартості та втрат. Виявлено ідентичність загального виду цільових функцій для трансформаторів, реакторів і асинхронних машин (відповідно до єдиного електромагнітного принципу дії), що уможливує уніфіковану структурно-параметричну оптимізацію ЕМС ТТ/ТР.

Аморфні сталі мають нижчий коефіцієнт заповнення перерізу стрижня ($\approx 0,80$ – $0,85$) порівняно з кристалічними ($\approx 0,96$ – $0,97$) та характеризуються

підвищеною вартістю і крихкістю, що обмежує їх застосування; стикові поєднання комбінацій ЕТС потребують відпрацювання технологій зварювання й тонких термостійких ізоляційних покриттів у стиках [4].

Отже, проведений аналіз показує, що традиційні способи побудови магнітопроводів, зокрема *step-lap*, уже не забезпечують необхідного рівня ефективності для трансформаторів і трансформаторних підсилювачів I–III габаритів відповідно до сучасних нормативних вимог. Значного підвищення енергоефективності та електромагнітної сумісності можна досягти шляхом комбінування анізотропної, ізотропної та аморфної електротехнічної сталі з використанням шевронних пластин та інтегрального зварювання, що дає змогу зменшити нерівномірність магнітного поля й кутові втрати. Введення багатогранних (восьми- та шестигранних) контурів сприяє зниженню «мертвої» маси конструкції та більш рівномірному розподілу індукції в осерді. Застосування ортогональних шарів і просторових Т-подібних структур дозволяє ефективно усунути треті гармоніки контурних потоків, що покращує стабільність роботи трансформаторів. Додатково, використання методу універсальних безрозмірних цільових функцій забезпечує комплексну оптимізацію електромагнітних систем трансформаторів за основними критеріями — масою, вартістю та втратами, що створює передумови для розробки уніфікованих та високоефективних конструкцій нового покоління.

Список використаних джерел

1. Ставинський А.А., Авдєєва О.А., Кошкін Д.Л., Ставинський Р.А., Циганов О.М. Технічні рішення щодо зниження втрат в магнітопроводах і матеріаломісткості трифазного трансформаторно-реакторного обладнання. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2024, № 2.
2. Osinski P., Witzak P. Analysis of core losses in transformer working at static var compensator. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 12. P. 4584.
3. Niekerk D., Schoombie B., Bokoro P. Design of an experimental approach for characterization and performance analysis of high-frequency transformer core materials. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 9. P. 3950.
4. Paul A. K. Practical study of mixed-core high frequency power transformer. *Magnetism*. 2022. Vol. 2, no. 3. P. 306–327.

Abstract: *The relevance of reducing no-load losses in magnetic circuits of three-phase transformers (25–2500 kVA, 6–10 kV) and reactors in the context of the enhanced requirements of EN 50464-1 and IEC 60034-30 is substantiated. The limitations of traditional approaches (anisotropic steels with Step-lap/Multi-step-lap joints, amorphous steels, “encapsulated/cable” windings) in achieving a significant reduction in losses without increasing material consumption are shown. A set of solutions is proposed: combining anisotropic, isotropic, and amorphous ETCs; chevron inserts with integral welding; orthogonal mutual arrangement of layers in planar/spatial joint magnetic conductors; transition from rectangular/circular to polygonal contours (octagonal and hexagonal). It has been proven that hexagonal internal contours and octagonal external contours reduce field unevenness in yokes, eliminate the “dead” mass of corner zones, and reduce losses; for twisted sections, the elimination of third harmonics is ensured by magnetic coupling/orthogonality of*

layers. For a reasonable choice of options, the method of universal dimensionless objective functions (mass/cost/losses) is used, which unifies the comparison of EMC TT/TR.

Keywords: *three-phase transformer; reactor; laminated/wound magnetic circuit; transformer manufacturing; anisotropic/isotropic/amorphous electrical steel; step-lap; octagonal and hexagonal contours.*

Науковий керівник:

Ставинський А.А.

доктор тех. наук, професор

кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Миколаївський національний аграрний університет