

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.082>

ЗНИЖЕННЯ МІСЦЕВИХ НАГРІВІВ У БАКАХ ПОТУЖНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЕПЛОВІДВІДНИМИ ЛОКАЛЬНИМИ РАДІАТОРАМИ З РЕБЕРНОЮ ОСНОВОЮ

В.Ф. Іванков¹, канд. техн. наук, **А.В. Басова**², канд. техн. наук, **І.В. Хімюк**³, канд. техн. наук,

^{1,2} – ПрАТ «Запоріжтрансформатор»,
Дніпровське шосе, 3, Запоріжжя, 69600, Україна

³ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: vcpkpi@ied.org.ua

Представлено основні підходи, результати чисельного моделювання та приклади практичного застосування тепловідвідних радіаторів з алюмінію, як із плоскою, так і з реберною основами для зниження місцевих нагрівів у феромагнітних кришках та стінках баків трансформаторів, які виникають у випадках концентрації магнітних потоків із багатоамперних відведень або з магнітних шунтів. Розглянуто випадок теплового спряження немагнітної полки ярмової балки з плоскою основою радіатора (мідною пластиною), який показує можливість зниження місцевого нагріву балки за допомогою кондуктивного теплообміну між полкою і пластиною та конвекційного теплообміну з їхніх поверхонь в охолодне масло. Бібл. 4, рис. 7.

Ключові слова: трансформатори, нагрів, радіатори з реберною основою.

Вступ. Під час теплових випробувань потужних силових трансформаторів методами дистанційного термометричного вимірювання або промислової експлуатації потужних силових трансформаторів можуть спостерігатися локальні місцеві нагрів кришок та стінок баку з феромагнітної сталі, що перевищують допустимі норми. Відомі випадки, коли це змушувало в заводських умовах феромагнітні кришки замінювати на конструкції зі вставками з немагнітної сталі, а в експлуатації – обмежувати робочу потужність устаткування.

Для прикладу на рис. 1, а наведено термограму кришки бака між коробками вводів сусідніх фаз із температурою 103 °С, отриману в умовах експлуатації за температури охолодного середовища (ТОС) – 12 °С і трохи нижчої – верхньої частини стінки бака трифазного трансформатора 200 МВА. За нормальних умов експлуатації (ТОС 20 °С) абсолютна температура зовнішньої поверхні кришки досягатиме 135 °С. Оскільки за товщиною сталі бака перепад температури незначний (близький до 1 К), то вказана температура визначатиме перевищення внутрішньої температури поверхні баку в маслі над ТОС $135 - 20 + 1 = 116$ К, що значно більше допустимого значення 75 К та 85 К (у точках, які не контактують із твердою ізоляцією). Кришку та стінку бака вказаного трансформатора

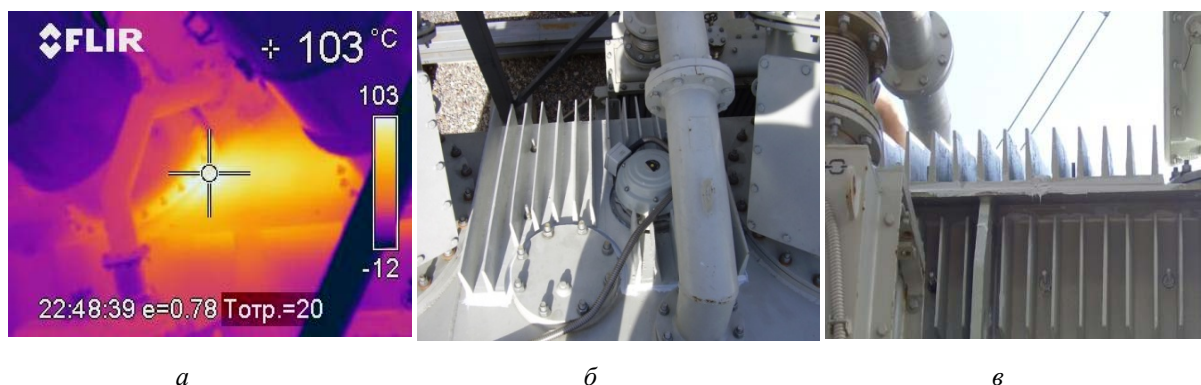


Рис. 1

виготовлено з феромагнітної сталі. Локальні втрати та відповідні їм нагріви зумовлені дією магнітних потоків паралельних кришці бака відведень нижчої напруги (НН) зі значними струмами.

Для зниження вказаних нагрівів апробовано тепловідвідні радіатори з плоскою та з реберною основами. Вони розміщені на кришці бака в проміжках між фланцями кріплення коробок вводів НН сусідніх фаз (рис. 1, б), а також у верхній частині стінки бака між вертикальними ребрами жорсткості в зоні дії магнітних полів відведень (рис. 1, в).

Плоска основа радіатора передає тепло від джерела (від бака) до стоку (у зовнішнє повітря). Її поверхня, яка розсіює тепло, визначається як первинна, або основна (несуча). Для інтенсифікації розсіювання тепла первинна поверхня розвивається за допомогою плоских смуг – ребер. Теплообмін під час теплового спряження конструкційних частин трансформатора та радіаторів відбувається через теплопровідності (кондукції) під час теплового контакту плоскої основи радіатора з елементом конструкції, у якій виділяються втрати, конвекцією в охолодне масло, а також конвекцією в охолодне повітря та випромінюванням із поверхні елементів радіатора в зовнішній простір.

Теплообмін радіаторів з реберною основою для умов природної конвекції охолодного повітря розглянуто в [1] для конструкції радіоелектронних пристроїв. Представлено інженерний метод розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі декількох характерних типів радіаторів. Зроблено висновки, що розсіювана радіаторами потужність здебільшого визначається зовнішніми умовами теплообміну та геометричними параметрами радіаторів, а теплопровідність матеріалу ребер і їхня товщина мають другорядне значення й мають обиратись із конструктивних та технологічних міркувань. Рекомендовано забезпечити тепловий контакт ребер з основою литтям, зварюванням чи пайкою, а повна поверхня тепловіддачі радіатора не мусить значно перевищувати поверхню основи. Крім того, поверхню радіатора треба покривати фарбами з високим ступенем чорноти. Загальні питання теплообміну на розвинутих поверхнях, розрахунку та конструювання теплообмінників різного призначення представлено, зокрема, в [2].

Однак розглянуті в [1, 2] варіанти конструкції та оцінювання тепловіддачі радіаторів не є прийнятними в разі їхнього застосування для зниження місцевих нагрівів елементів конструкції в силових трансформаторах. Практичне застосування тепловідвідних радіаторів з реберною основою для вказаної мети потребує спеціальних досліджень з урахуванням особливостей виділення втрат у елементах конструкції з феромагнітної та з немагнітної сталі, а також умов теплообміну з внутрішнім охолодним маслом у баку та зовнішнім повітрям.

Методи розрахунку магнітних полів обмоток та відведень на поверхнях баку, як аналітичні, так і чисельні, є достатньо відомими [3, 4]. Поверхневі втрати у феромагнітному півпросторі, яким можна вважати плоскі частини баку трансформатора, визначаються через тангенціальну складову напруженості магнітного поля й емпіричні значення нелінійного поверхневого імпедансу. Як для бака, так і в частинах конструкції обмежених розмірів із феромагнітної сталі під час чисельних розрахунків використовується також метод об'ємних втрат як суми складових на вихрові струми та на перемагнічування конструкційної сталі з нелінійною магнітною характеристикою і з гістерезисом. З використанням розрахунково-емпіричних значень коефіцієнтів тепловіддачі в охолодне середовище проводяться теплові розрахунки [4].

Тому розраховані чи виміряні безпосередньо на наявному устаткуванні нагріви в досліджуваних конструкційних частинах трансформатора будемо вважати відомими.

Метою роботи є представлення основних підходів, результатів чисельного моделювання і прикладів практичного застосування локальних тепловідвідних радіаторів із плоскою тепловою основою та з ребрами для зниження місцевих нагрівів у баках, а також плоских теплових елементів для зниження нагрівів елементів конструкції активної частини потужних трансформаторів.

Зниження тепловідвідними радіаторами з реберною основою місцевих нагрівів кришки та частин стінки бака з феромагнітної сталі.

Зазвичай поле розсіяння обмоток на кришках або на стінках бака через їхнє віддалення від обмоток є відносно рівномірним та менш інтенсивним, ніж концентровані магнітні потоки відведень, які відрізками скінченних розмірів проходять на незначних відстанях від поверхонь кришок або стінок. Втрати концентруються в зоні проєкції осі відведення на площину бака, зменшуючись у перпендикулярному напрямку приблизно за параболою від максимального значення. Тому зона підвищених температур поверхні баку спостерігається у вигляді певної смуги, довжина якої визначається поздовжнім розміром відведення та може обмежуватися конструктивними елементами, зокрема, вирізами під кріплення коробок вводів (рис. 1, а).

Також зауважимо, що на поверхню феромагнітного бака трансформатора електромагнітне поле обмоток та відведень майже не проникає й не може спричинити виникнення вихрових струмів та втрат у провідній основі та в ребрах радіаторів, що пояснює і визначає, чому саме застосування провідних металевих радіаторів на кришках баків із немагнітної сталі не розглядається.

За теплову модель кришки чи стінки бака з поверхневим виділенням втрат приймається пластина скінченної ширини з двох шарів. Занурений у масло внутрішній шар із поверхневими втратами має товщину приблизно 1 мм унаслідок незначної глибини проникнення електромагнітного поля промислової частоти у феромагнітний півпростір. Інша частина кришки (стінки), звернена до повітря, визначається як зовнішній шар пластини, але без виділення втрат. У спряженій тепловій моделі феромагнітної пластини та радіатора нехтуватимемо тепловим опором контакту між поверхнею бака і плоскою основою радіатора, що може виникати внаслідок мікронерівностей пари поверхонь [1]. Указаний чинник виключається через нанесення на попередньо зачищену від фарби поверхню бака спеціальної клейової суміші на основі оксиду цинку із робочою температурою 180 °С та зі скінченним значенням коефіцієнту теплопровідності. Болтове кріплення основи радіатора до бака забезпечує необхідний рівень притискного зусилля.

Покажемо основні підходи та результати досліджень на прикладі кришки бака трансформатора 200 МВА за рис. 1. Виділено частину кришки бака товщиною 14 мм із розмірами 1046 × 1110 мм. Перший розмір – між коробками вводів, другий – ширина кришки. На поверхні досліджуваної частини кришки баку кріпиться тепловідвідний радіатор.

Указану модель досліджено методами [4] чисельного моделювання теплових процесів за допущення, що вони є усталеними, а основні температурні параметри можна приймати постійними. Коефіцієнти тепловіддачі з поверхонь розрахункових елементів визначено для умов природної конвекції, тобто за природного руху масла всередині баку й повітря на його поверхні та на поверхні радіатора [4]. Так, коефіцієнти тепловіддачі в масло з нагрітої поверхні баку та з ненагрітої поверхні прийнято рівними 100, 50 Вт/(м²×К). На зовнішній поверхні баку та на радіаторах результуючий коефіцієнт тепловіддачі визначається сумою коефіцієнтів конвективного та променевого теплообміну в повітря і приймається рівним 14, Вт/(м²×К). Коефіцієнти теплопровідності феромагнітної сталі, алюмінію та міді прийнято відповідно рівними 47, 200, 397, Вт/(м×К).

Втрати розподілено у внутрішньому шарі розрахункової пластини в смугі завширшки 300 мм. Їхню величину підібрано у такий спосіб, щоби найбільша температура на поверхні кришки в повітрі досягала виміряного значення 103 °С. Досліджено випадки кріплення на поверхні пластини з втратами плоскої основи з алюмінію товщиною 15 мм, радіатора з вертикальними ребрами товщиною 7 мм, заввишки 100 мм та з кроком 100 мм, які розташовані в обмеженій зоні найбільших нагрівів і орієнтовані вздовж пластини, радіатора з ребрами за шириною пластини поперек зони нагріву, а також радіатора з конструктивними вирізами. Указані випадки розрахункових моделей і розподілу температур показано на рис. 2.

Отримано такі розрахункові значення. Початкова найбільша температура внутрішньої поверхні пластини (кришки бака в маслі) досягає 104 °С – верхня частина (рис. 2, а), що відповідає показам термограми на рис. 1, а. У разі теплового спряження лише з плоскою основою з алюмінію температура пластини знижується до 75 °С – низ (рис. 2, а). За наявності поздовжніх ребер внутрішня поверхня кришки зменшує свій нагрів до 66 °С – верх (рис. 2, б).

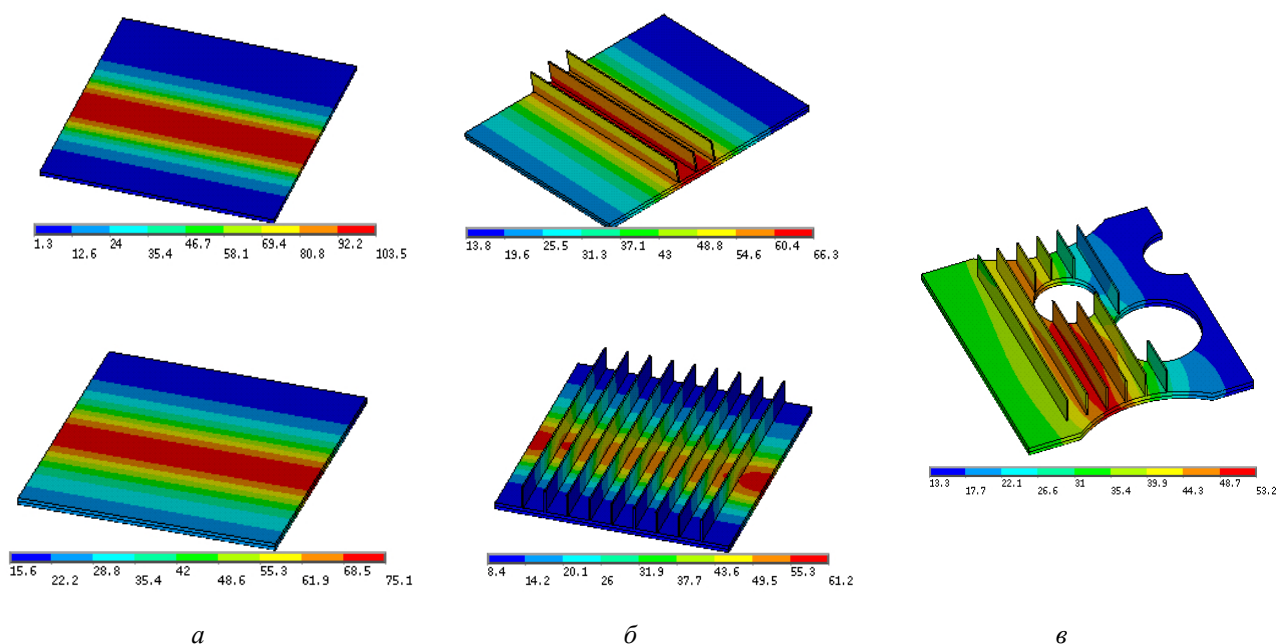


Рис. 2

Установлення поперечних ребер на всій поверхні плоскої основи знижує нагрів кришки до $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ – низ (рис. 2, б), а в конструкції з вирізами в кришці та в радіаторі найбільша температура досягає $53\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Плоска основа радіатора з алюмінію знижує температуру внутрішньої поверхні кришки на 29 K – зі 104 до $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, додатково на 14 K – із 75 до $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ нагрів кришки знижують поперечні ребра радіатора. У сумі досягнуто зменшення місцевого нагріву кришки баку на 43 K .

Моделюванням також визначено, що більш значне зниження температури, на 39 K , забезпечує плоска основа радіатора з міді – зі 104 до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, але радіатор із міді з технологічних міркувань у цьому випадку не застосовується.

Спостерігається, що основне зниження нагріву внутрішньої поверхні баку відбувається внаслідок теплового спряження кришки баку з плоскою алюмінієвою основою, маса якої співрозмірна з досліджуваною частиною кришки баку, а коефіцієнт теплопровідності алюмінію майже в п'ять разів більший від сталі. Кондуктивним теплообміном зона підвищених температур розширюється з одночасним зменшенням найбільшого значення нагріву кришки баку. Наведене спостереження відповідає твердженню [2], що «коли реберна поверхня є в середовищі з однорідною температурою, то поверхня ребра менш ефективна в сенсі тепловіддачі, ніж основна поверхня, на якій закріплені ребра».

Конструкцію вилитих з алюмінію та встановлених тепловідвідних радіаторів з реберною основою на кришці та на верхній частині стінки баку трансформатора 200 MVA показано на рис. 1. Забезпечено подальшу експлуатацію трансформатора без зауважень і за підвищених коефіцієнтів потужності.

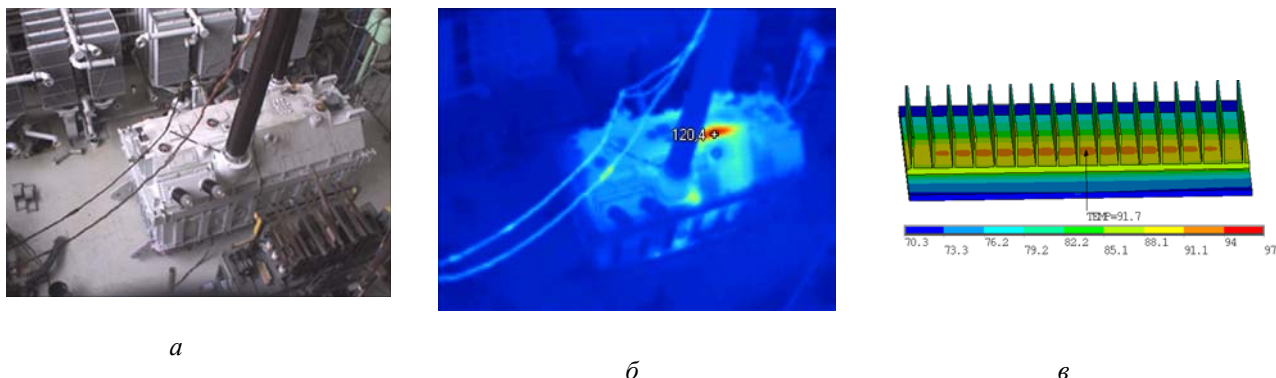


Рис. 3

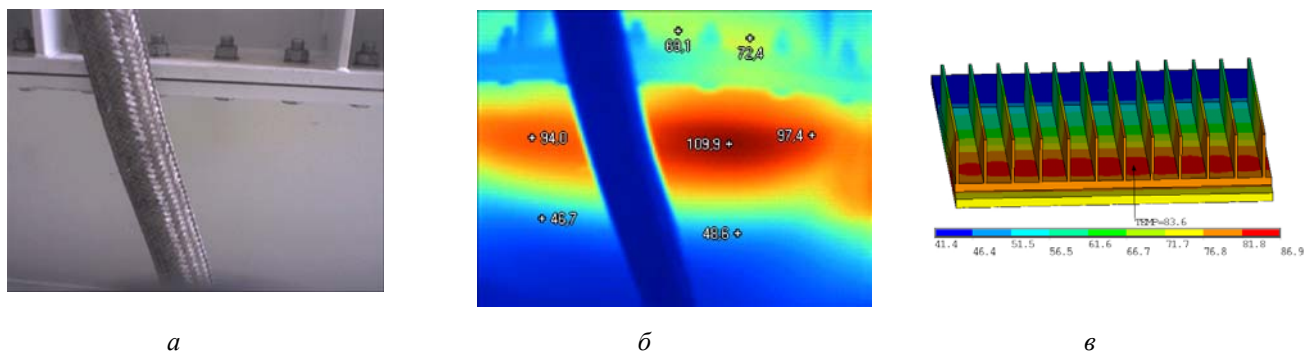


Рис. 4

Розглянемо застосування тепловідвідних радіаторів з реберною основою з алюмінію для зниження місцевих нагрівів феромагнітної кришки та нижньої частини стінки бака однофазного трансформатора 500 МВА.

На рис. 3 показано загальний вид трансформатора та відповідну термограму поверхні кришки бака під час спеціальних теплових випробувань за кратності струму 1.2 від номінального і з відключенням системи охолодження. Найбільша температура зовнішньої поверхні кришки досягає 120 °С за ТОС 20 °С. Закріплення на поверхні кришки бака тепловідвідного радіатора з плоскою основою з алюмінію та з поперечними ребрами забезпечує зниження температури до 97 °С (рис. 3, в).

Подібне зниження зі 110 до 87 °С забезпечує встановлення радіатора на нижній частині стінки бака (нижче горизонтального роз'єму) цього ж трансформатора (рис. 4).

В обох випадках до значних нагрівів стінки баку спричинили магнітні потоки з неоптимізованої конструкції вертикальних магнітних шунтів на баку. Зауважимо, що для номінальної експлуатаційної потужності трансформатора нагриви досліджених частин баку досягають значень, що не перевищують допустимі.

Під час розроблення перетворювального однофазного трансформатора 45 МВА було визначено значний нагрів верхньої частини поздовжньої феромагнітної стінки бака від горизонтальної групи 9 відведень регульовальної обмотки із сумарним струмом 9×971.2 А, які, через габаритні обмеження, проходили досить близько до стінки баку (рис. 5).

Для оцінювання нагріву стінки баку від магнітного поля відведень використано плоскопаралельну модель горизонтальної кришки та вертикальної стінки бака і вказаної групи відведень (рис. 5, а). Розрахунок магнітного поля проведено методами [4] чисельного моделювання, враховано нелінійні властивості феромагнітної конструкційної сталі баку, поверхневий ефект, залежність коефіцієнту електричної провідності від температури. На рис. 5, б показано розподіл у перерізі розрахункової моделі амплітудних значень вертикальної складової напруженості магнітного поля, яка є дотичною до поверхні стінки баку, і її найбільші значення в певній смузі дорівнюють $H_m = 12000$ А/м.

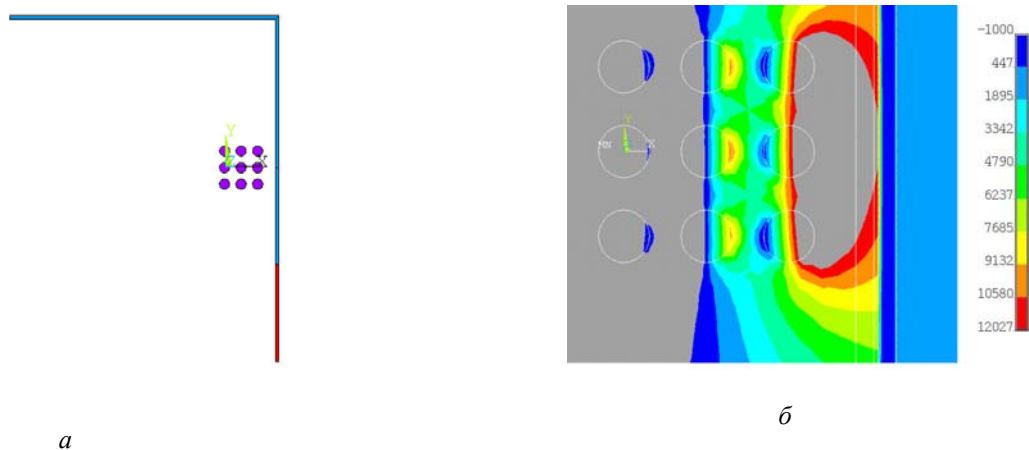


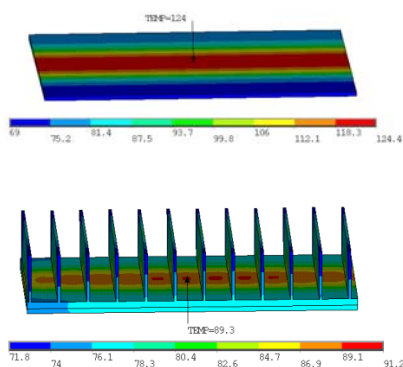
Рис. 5

Для оцінювання втрат використано емпіричну залежність поверхневих втрат $p(H_m)$ від значення H_m [3]. Додатково їхні значення збільшено на розрахований для конструкційної сталі коефіцієнт 1.29 на вищі гармоніки для досліджуваного перетворювального трансформатора. Поверхневі втрати дорівнюють $P=p(H_m) \times 1.29=8500 \text{ Вт/м}^2$.

Коефіцієнт тепловіддачі з вертикальної поверхні для прийнятої системи охолодження трансформатора типу OFWF визначено залежністю [4] $\alpha=7,26P^{0,33}$ та отримано значення $\alpha=141 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$. Тому перевищення температури внутрішньої поверхні баку над охолодним маслом рівне $\theta=P/\alpha=57 \text{ К}$. За сумарними втратами трансформатора розраховано, що температура верхнього масла в баку трансформатора дорівнює $67 \text{ }^\circ\text{C}$. Отже, температура досліджуваної частини стінки баку без радіаторів досягає найбільшого значення $57 + 67 = 124 \text{ }^\circ\text{C}$.

За наведеним вище підходом розроблено чисельну модель феромагнітної двохарової пластини з розподілом втрат за рис. 5, б. Отримано її розрахунковий нагрів $124 \text{ }^\circ\text{C}$ (верх рис. 6, а).

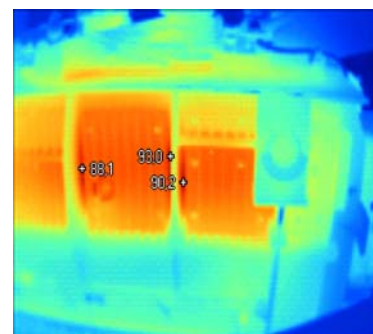
Встановлення на стінці баку (рис. 6, б) радіаторів з алюмінію з товщиною основи 20 мм та з поперечними ребрами забезпечило зниження найбільшої температури внутрішньої (у маслі) поверхні стінки баку до $91 \text{ }^\circ\text{C}$, як показано на розрахунковій моделі на нижній частині рис. 6, а. Водночас максимальна температура зовнішньої поверхні радіатора в повітрі за розрахунком становить $89 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 6, а), за результатами вимірів – $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (термограма на рис. 6, в).



а



б



в

Рис. 6

Зниження теплопровідною пластиною місцевих нагрівів ярмової балки. Під час дослідження моделі пластини із втратами (рис. 2), на поверхні якої закріплено лише плоску основу (пластину без ребер) із міді було отримано значне зниження місцевої температури кришки баку – майже так само, як у разі застосування алюмінієвого радіатора з ребрами. Цей факт пояснюється майже вдвічі більшим коефіцієнтом теплопровідності міді щодо алюмінію.

Указаний результат використано для зниження місцевих нагрівів верхньої полки з немагнітної сталі нижньої ярмової балки однофазного трансформатора 533 МВА. Ескіз розрахункової моделі трансформатора показано на рис. 7, а. Тривимірну геометрію моделі створено перерізом конструкції за поперечною віссю стрижня й за поздовжньою віссю трансформатора. Зовнішню поверхню моделі обмежено поверхнею феромагнітного баку. Модель містить магнітну систему, U-подібну обмотку НН із виносом переходу зі струмом між шарами обмотки на рівень нижньої ярмової балки, обмотку ВН, магнітні шунти між обмотками та нижньою балкою (рис. 7, б). Стінка балки з вертикальними розрізами виготовлена з феромагнітної сталі, а горизонтальні полки – з немагнітної.

Дослідження електромагнітних та теплових процесів проведено методами [4] чисельного моделювання. Під час розрахунків ураховано конвекційний теплообмін балки та мідної пластини в охолодне масло з використанням емпіричних коефіцієнтів тепловіддачі з вертикальних та горизонтальних поверхонь [4]. Визначено, що найбільша температура верхньої полки в центральній частині балки під обмотками досягає $117 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7, б). Для

зниження значного місцевого нагріву верхньої полки на її поверхні встановлено мідну смугу. Це забезпечило за допомогою кондуктивного теплообміну зменшення абсолютної температури в спряжених тілах полки та пластини до 91 °С (рис. 7, в), тобто перевищення над ТОС (71 К) стало меншим допустимого значення.

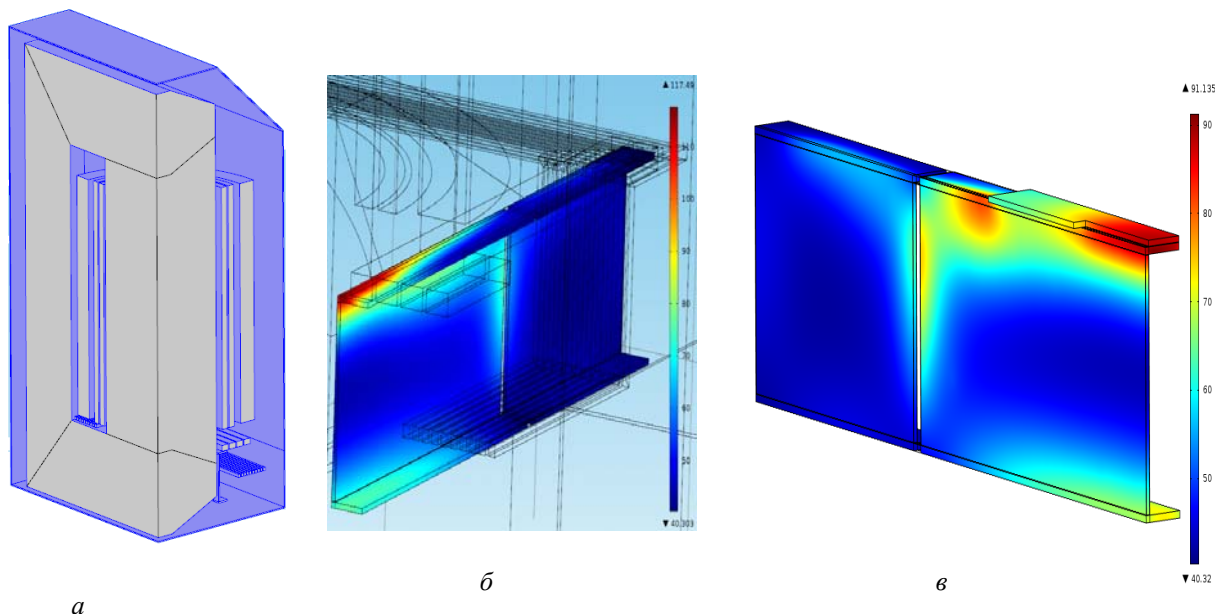


Рис. 7

Зауважимо, що в такому випадку, на противагу застосуванню тепловідвідних радіаторів на феромагнітних поверхнях баку трансформатора, необхідно мінімізувати електричний контакт між контактними поверхнями полки та мідної пластини, наприклад, використовуючи пофарбування поверхні балки. В іншому випадку можливе затікання вихрових струмів з об'єму мідної пластини в немагнітну полку. Додатково визначено, що через незначну товщину та поперечний розмір мідної пластини вихрові струми в її об'ємі від магнітного поля обмоток та перемички між шарами НН у досліджуваній конструкції не спричиняють помітних додаткових нагрівів пластини.

Висновок. Чисельним моделюванням та прикладами практичного застосування показано ефективність застосування тепловідвідних алюмінієвих радіаторів з реберною основою для зниження місцевих нагрівів феромагнітних частин баків потужних трансформаторів, які виникають, зокрема, у випадках дії магнітних полів багатоамперних відведень або у випадках виходу значного магнітного потоку на внутрішню поверхню стінки баку з магнітних шунтів.

Теплообмін у спряжених частинах конструкції баків і радіаторів відбувається теплопровідністю за теплового контакту плоскої основи радіатора з елементом конструкції, у якій виділяються втрати конвекцією в охолодне масло, що омиває елемент конструкції, конвекцією в охолодне повітря, а також випромінюванням із поверхні елементів радіатора в зовнішній простір.

Дослідження теплового спряження немагнітної полки ярмової балки з мідною пластиною показує можливість зниження місцевого нагріву полки за допомогою кондуктивного теплообміну між полкою балки та пластиною та конвекційного теплообміну з їхніх поверхонь в охолодне масло.

Указані види теплообміну необхідно розглядати з урахуванням особливостей виділення втрат в елементах конструкції трансформаторного устаткування з феромагнітної та немагнітної сталі, а також умов теплообміну з внутрішнім охолодним маслом у баку та зовнішнім повітрям.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробити нові моделі та методи дослідження електродинамічних процесів в електроенергетичному устаткуванні (генератори, трансформатори, двигуни власних потреб та ін.) для вирішення задач підвищення його надійності, контролю й діагностики» (Комплекс-4), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 07.07.2015 протокол №16. Державний реєстраційний номер 0115U004398.

1. Дульнев Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963, 288 с.
2. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977, 464 с.
3. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981, 392 с.
4. Іванков В.Ф., Басова А.В., Хімюк І.В. Методи моделювання трансформаторів та реакторів. К.: Наш формат, 2017, 490 с.

REDUCTION OF LOCAL HEATING IN TANKS OF POWERFUL TRANSFORMERS BY HEAT-REMOVING LOCAL RADIATORS WITH RIBBED

V.F. Ivankov¹, A.V. Basova², I.V. Khimiuk³,

^{1,2} - PrJSC «ZTR», Dniprovske shose, 3, Zaporizhyya, 69600, Ukraine;

³ - Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The main approaches, the results of numerical modeling, and examples of the practical application of heat-dissipating radiators made of aluminum, with a flat base, and with ribbing to reduce local heating in ferromagnetic covers and walls of transformer tanks, which arise in cases of concentration of magnetic fluxes from multi-ampere taps or magnetic shunts are presented. The case of thermal coupling of a non-magnetic flange of a yoke beam with a flat base of a radiator (copper plate) is considered, which shows the possibility of reducing local heating of the beam using conductive heat transfer between the shelf and the plate and convection heat transfer from their surfaces to cooling oil. References 4, figures 7.

Keywords: transformers, heating, finned radiators.

1. Dulnev G.N. Heat exchange in radio electronic devices. M.-L., Gosenergoizdat, 1963, 288 p. (Rus)
2. Kern D., Kraus A. Developed surfaces of heat exchange. M.: Enerhiia, 1977, 464 p. (Rus)
3. Leites L.V. Electromagnetic calculations of transformers and reactors. M.: Enerhiia, 1981, 392 p. (Rus)
4. Ivankov V.F., Basova A.V., Khimiuk I.V. Methods of modeling transformers and reactors. K.: Nash format, 2017, 490 p. (Ukr)

Надійшла: 30.12.2020

Received: 30.12.2020