

**В.Ф.Іванков**, канд.техн.наук, **А.В.Басова** (ВАТ «Запоріжтрансформатор», Запоріжжя), **І.В.Хімюк**, канд.техн.наук, **С.С.Кокошин**, канд.фіз.-мат.наук (Інститут електродинаміки НАН України, Київ), **В.О.Іванков** (Вінницький НТУ, Вінниця)

## РОЗРАХУНОК МАГНЕТНОГО ПОЛЯ, ВТРАТ ТА НАГРІВУ У ПРЕСУВАЛЬНІЙ ПЛАСТИНІ І ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ЕКРАНИ НА СТРИЖНІ ТРАНСФОРМАТОРА І ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА

*Розглянуто практичні методики розрахунку магнетного поля, вихрових струмів, втрат і оцінки нагрівів у провідних смугах пресувальної пластини та електростатичних екранів, розташованих на стрижнях магнетної системи трансформатора і шунтувального реактора. За величиною максимальних поверхневих втрат проведено оцінку нагріву на вертикальних краях смуг екрану. При розгляді етапів розв'язання задачі використані як аналітичні методи, так і спеціальні процедури чисельного аналізу методом скінченних елементів із застосуванням програмного забезпечення ANSYS.*

*Рассмотрены практические методики расчета магнитного поля, вихревых токов, потерь и оценки нагревов в проводящих полосах пресующей пластины и электростатических экранов, устанавливаемых на стержнях магнитной системы трансформатора и шунтирующего реактора. По величине максимальных поверхностных потерь проведена оценка нагрева на вертикальных краях полос экрана. При рассмотрении этапов решения задачи использованы как аналитические методы, так и специальные процедуры численного анализа методом конечных элементов с применением программного обеспечения ANSYS.*

**Вступ.** У силових трансформаторах і в електричних шунтувальних реакторах для екранування стрижнів магнетної системи (МС) застосовуються електропровідні електростатичні екрани. Зокрема, фірмою Weidmann поставляються так звані гнучкі циліндрові екрани [11,12]. Між картонними циліндрами екрану розташовані ізолювані одна від одної вертикальні електропровідні смуги з алюмінію (рис. 1 – з роботи [11]). На кінцях знизу і зверху ці смуги сполучені провідними елементами, що замикають загальний електричний контур екрану. Під дією магнетного поля в провідних смугах екрану наводяться вихрові струми з концентрацією найбільших втрат і нагрівів на їх вертикальних краях.

У дослідженнях фірми [11] розрахунковими оцінками і експериментально показано, що для трансформатора рекомендованим є застосування алюмінієвих смуг, що мають товщину  $d = 0.02$  мм та ширину смуги  $b = 20 - 25$  мм. Такі розміри смуг забезпечують допустимі нагріву екрану.

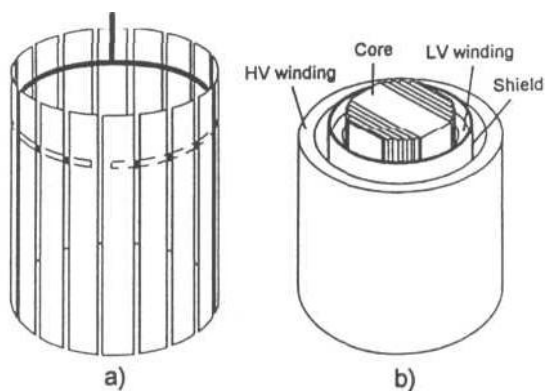


Рис. 1

Застосування вказаних екранів для електричних шунтувальних реакторів вимагає спеціального розгляду. Це пов'язано із різним характером магнетного поля на поверхні провідних смуг екрану реактора в порівнянні з полем на поверхні екрану трансформатора.

Стрижень МС реактора виконується у вигляді феромагнетних кругових дисків, які набираються з пластин електротехнічної сталі. По висоті стрижня диски відокремлюються один від одного циліндровими керамічними прокладками. Так зване «випинання» магнетного потоку із проміжків стрижня викликає на поверхні вставок стрижня, а отже, і на поверхні близько розташованих до стрижня смуг екрану, значні магнетні поля. При цьому епора поля на поверхні смуг екрану має різкі переходи по кількості повітряних проміжків.

Подібні питання виникають і при аналізі розподілу вихрових струмів, втрат та нагрівів в пресувальних плитах з немагнетної сталі, що розташовані на поверхні стрижня трансформатора.

Метою роботи є виклад практичної методики, що дозволяє виконати розрахунок магнетного поля, вихрових струмів і нагріву пресувальних плит та електростатичного екрану як трансформатора, так і шунтувального реактора із проміжками в стрижні МС.

**Формулювання загальної електромагнетної задачі.** Виходячи із системи рівнянь Максвелла для комплексних амплітуд та використовуючи векторний потенціал  $\vec{A}$ , електромагнетне поле трансформаторного пристрою визначають рівнянням [3,7]

$$\Delta \vec{A} = i\omega\sigma\mu\vec{A} - \vec{j}^{cm} - grad \varphi, \quad (1)$$

де  $\omega$  – кругова частота струму,  $\sigma$  – електрична провідність,  $\mu$  – магнетна проникність,  $\vec{j}^{cm}$  – вектор густини сторонніх струмів,  $i = \sqrt{-1}$ . Для анізотропних середовищ величини  $\sigma$ ,  $\mu$  є тензорами. Рівняння (1) доповнюється відповідними граничними умовами для векторного потенціалу [3,7].

Потенціал  $\varphi$ , що входить в рівняння (1), може бути вибраний довільно і, зокрема, тотожно рівним нулю. Рівняння (1) зв'язує електромагнетне поле, яке збуджується сторонніми струмами в обв'язках, і поле, що виникає в результаті дії вихрових струмів в провідних частинах, в яких електрична провідність не рівна нулю, тобто в даному випадку – в смугах пресувальної пластини та екрану.

Якщо провідність середовища  $\sigma$  рівна нулю або зворотною дією вихрових струмів нехтують, то визначають магнетне поле тільки через струми обвиток [3,7]

$$\Delta \vec{A} = -\vec{j}^{cm}. \quad (2)$$

Вихрові струми розподілені в площині пластин, що викликає необхідність розгляду загальної моделі як тривимірної. Рішення такої задачі неможливе аналітичними методами. Пряме чисельне моделювання рівняння (1) для комплексних амплітуд сумарного електромагнетного поля трансформаторних пристроїв методом скінченних елементів із застосуванням програмного забезпечення, наприклад, ANSYS\Emag3D [10], також зустрічає принципові труднощі через надмірно велику розрахункову сітку кінцево-елементної моделі пристрою, оскільки загальні розміри МС, обвиток трансформатора або реактора вимірюються метрами, а товщина провідної пластини екрану – частками міліметрів.

**Основні допущення і розрахункові моделі.** Фізично обґрунтовано ряд допущень, які дозволяють загальну задачу звести до розгляду ряду простіших розрахункових моделей.

Смуги пресувальної пластини та електричного екрану можуть розглядатися як тонкі немагнетні пластини товщиною  $d$  з питомою електричною провідністю  $\sigma$  і магнетною проникністю повітря  $\mu_0$ .

Товщина таких пластин набагато менша глибини проникнення електромагнетної хвилі  $\Delta = \sqrt{2/(\omega\sigma\mu_0)}$ , і тому розподіл вихрових струмів по товщині пластин можна вважати рівномірним.

Також для геометричних співвідношень, які характерні для смуг пресувальної пластини та екрану при промисловій частоті  $f = 50$  Гц, допустимим є нехтування зворотнім впливом вихрових струмів на зовнішнє поле збудження. Тому зовнішнім магнетним полем збудження до поверхні смуг пресувальної пластини та екрану можна прийняти поле, яке створюється полем розсіяння обвиток трансформатора або магнетним полем обвитки реактора в повітрі, по контуру, який співпадає з положенням цих елементів на стрижні МС.

Для трансформаторів можуть бути застосовані двовимірні плоскопаралельні і плоскомеридіанні розрахункові моделі, що допускають розв'язання аналітичними методами [3]. Для реакторів застосовується комбінація аналітичних методів (для виділення первинного поля обмотки реактора) і чисельного методу інтегральних рівнянь (для врахування дискретних феромагнетних вставок стрижня МС) [3]. При цьому особливості магнетного поля у так званих перетинах вздовж малої осі (у бік поздовжніх стінок бака) або вздовж великої осі (у вікні МС) трансформатора або реактора можуть бути вивчені шляхом формування положення феромагнетних частин конструкції, що враховуються (ярем МС, магнетних екранів у області обвиток і на баку, бака і т.п.) за вказаними перетинами.

Більш повна інформація про магнетне поле трансформатора або реактора може бути отримана чисельним моделюванням тривимірних розрахункових моделей за допомогою програмного забезпечення (ПЗ) ANSYS\Emag3D. Приклади таких досліджень наведено в роботі [2]. Із застосуванням вказаного ПЗ також можуть бути досліджені спрощені двовимірні розрахункові моделі окремого стрижня з обмотками трансформатора і реактора.

Розглянемо модель для розрахунку вихрових струмів у провідній пластині.

Враховуючи, що площини вертикальних смуг паралельні твірним обвиток, і переходячи до двовимірної системи координат, пов'язаної з окремою смугою, нормальне до площини смуги магнетне поле збудження по її ширині (по осі  $OX$ ) може бути прийнято постійним, а по висоті екрану (по осі  $OY$ ) – у вигляді розподіленої функції  $B_n = f(y)$ ,  $y \in (0, H)$ . Таким чином, задача розрахунку вихрових струмів у провідній смузі при заданому зовнішньому магнетному полі зводиться до двовимірної.

Запишемо крайову задачу для визначення вихрових струмів у межах пластини. Оскільки вихрові струми в межах пластини замкнуті і  $\text{div } \vec{J} = 0$ , введемо потенціал  $U$  так, щоб

$$\vec{J} = \text{rot}(\vec{n}U), \quad (3)$$

де  $\vec{n}$  – напрям нормалі до площини пластини.

Враховуючи рівняння Максвелла і гармонійну зміну поля ( $\partial/\partial t = i\omega$ ), для потенціалу  $U$  отримуюмо рівняння Пуассона [7]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -i\omega d\sigma B_n. \quad (4)$$

На зовнішній границі  $G$  пластини відсутні нормальні складові вихрового струму. Тому рівняння (4) для потенціалу  $U$  доповнюється умовами Діріхле

$$U|_G = 0. \quad (5)$$

Складові вектора вихрового струму в площині пластини (смуги екрану) визначаються виразами

$$J_x = \frac{\partial U}{\partial y}; \quad J_y = -\frac{\partial U}{\partial x}. \quad (6)$$

Усереднена за період коливань поверхнева густина  $w$  потужності втрат від вихрових струмів в пластині буде визначатись наступним чином

$$w = \frac{1}{2} \frac{d}{\sigma} j^2. \quad (7)$$

Задача (4) – (5) розглянута рядом авторів стосовно виконаної з немагнетної сталі пресувальної пластини, що встановлюється на поверхні стрижня трансформатора або на поверхні феромагнетних вставок до стрижня реактора при планарному шихтуванні пластин по перетину стрижня [6,8]. Розв'язання задачі (4) – (5) у [8] представлено у вигляді системи кінцево-різницевих рівнянь. Визначено параметри, які характерні для умов трансформатора: епюри поля в зоні поля збудження представлено у вигляді синусоїди, трапеції, трикутника; обмежено співвідношення ширини смуги пластини до довжини основи епюри поля збудження, обмежено набір товщини пластин. У кінцевому результаті для цих характерних співвідношень для інженерних розрахунків отримано спеціалізовані номограми для розрахунку максимальних втрат і оцінки нагрівів. Проте, вказані обмеження в цих параметрах не дозволяють застосувати вказану методику для провідних смуг електростатичних екранів реакторів.

Зручнішим для даної задачі є застосування розв'язання задачі (4) – (5) у вигляді ряду Фур'є з розподілом гармонік по довжині пластини, яке представлено в роботі [6], також за умови, що по ширині пластини поле постійне. Стосовно смуг електростатичних екранів таке допущення застосовне. Проте для пресувальних пластин це допущення не цілком прийнятне (допустиме), оскільки пластину за її положенням на стрижні необхідно розглядати як хорду до кола обвиток, а тому поле збудження, в принципі, не є постійним по ширині пластини. Тому в загальному вигляді розподіл поля збудження є нерівномірним як по ширині, так і по висоті пресувальної пластини.

У цьому випадку більш застосовне рішення, коли епюру магнетного поля на поверхні пресувальної пластини або смуги екрану можна представити у вигляді суперпозиції кусково-постійного по ширині ряду  $k = 1, \dots, K$  ділянок пластини зовнішнього поля, але періодичного по довжині кожної ділянки. Тобто в правій частині рівняння (4) функція розподілу зовнішнього поля може бути представлена у вигляді  $B(x, y) = \sum_k B_k(y, x_k, x_{k+1})$ . Розв'язок такої задачі наведено у [4] з використанням ряду

Фур'є по довжині пластини  $l$

$$U_k = \sum_m^{\infty} X_m(x, b, x_k, x_{k+1}) \sin(m\pi/l). \quad (8)$$

Функції по ширині пластини  $X_m$  є комбінацією експоненційних функцій залежно від місця  $k$ -ділянки в межах інтервалу ширини пластини  $\{0, b\}$  і в явних виразах наведені в [4].

Результуючі вихрові струми визначаються шляхом накладення вихрових струмів, які збуджуються по всій області пластини від дії зовнішнього поля окремих ділянок. Розрахунок втрат як локальних, так і сумарних виконується з використанням визначення (7).

Проте методики [4,6,8] непридатні у разі, коли необхідно досліджувати вихрові струми в пресувальних пластинах не тільки проти торців обвиток, де пластини мають вертикальні розрізи і кожна із смуг розглядається окремо, але і на ділянках, де в цих пластинах власне і починаються розрізи. Тому задача розрахунку вихрових струмів в пластинах довільної конфігурації, включаючи і розрізи, є актуальною і, як показано в цій роботі, може бути досліджена чисельним методом скінченних елементів (МСЕ) із застосуванням ПЗ ANSYS.

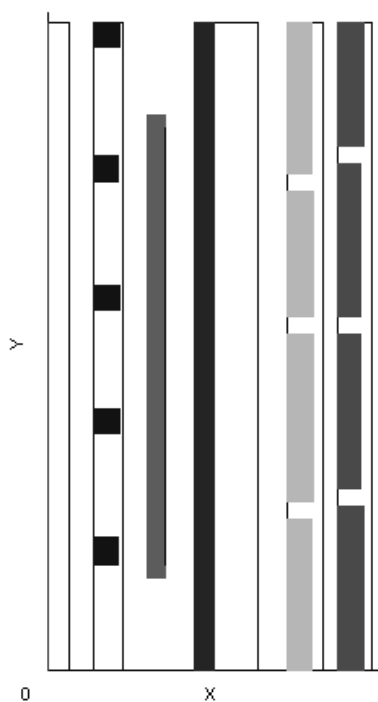


Рис. 2

**Розрахунок магнетного поля.** У даній роботі для розв'язання задачі розрахунку магнетного поля трансформаторів і реакторів за рівняннями (1) і (2) застосовується стандартне ПЗ ANSYS\Emag3D. Отримані чисельні розв'язки порівнюються при однакових постановках крайових задач з аналітичними і чисельно-аналітичними методами [3]. Для задачі (4) – (5) розрахунку вихрових струмів в провідній смузі електростатичного екрану також застосовуються два методи – аналітичний [4] і МСЕ.

Для порівняльного аналізу моделювання магнетного поля вибрано перетворювальний трансформатор, в якому при певному включенні в одній з обвиток розподіл ампервитків по її висоті різко нерівномірний, що викликає значні величини радіальної складової магнетної індукції в області обвиток. На рис. 2 контурними лініями показано розміри обвиток, а затіненими прямокутниками – зони певної щільності ампервитків.

Розрахункова область зверху і знизу обмежена поверхнями феромагнетних напівпросторів, які замінують поверхні горизонтальних торцевих ярем МС. В аналітичних рішеннях [3] ці напівпростори є ідеальними феромагнетиками, а моделі для МСЕ – ізотропними феромагнетиками із значенням магнетної проникності  $\mu = 1000 \mu_0$ . Для розрахунку стаціонарного магнетного поля розрахункової моделі трансформатора в ПЗ ANSYS/Emag3D використано елемент PLANE53 2D 8-Node Magnetic Solid. Картина силових ліній показана на рис. 3.

Для внутрішньої обмотки, прилеглої до головного каналу розсіяння, розподіл радіальної  $B_r$  і осьової  $B_o$  складових індукції магнетного поля на внутрішній (нижній індекс в позначенні – 1), на середній (2), на зовнішній (3) вертикальних твірних обмотки показано на рис. 4 для плоскомеридіанної моделі (для зручності аналізу складова  $B_r$  збільшена на графіку у 3 рази). Аналогічний розрахунок виконано і для варіанту плоскопаралельної розрахункової моделі. Порівняння результатів показало, що значення осьової складової в обох випадках практично однакові, радіальні складові на краю обвитки відрізняються незначно. Одержаний результат підтверджує, як і відзначено в [3], що для розрахунку магнетного поля розсіяння в області обвиток, стрижня МС трансформатора можуть бути застосовані як плоскопаралельні, так і плоскомеридіанні розрахункові моделі. При розрахунку поля в області істотно тривимірних частин конструкції, таких, наприклад, як ярмові балки чи бак трансформатора, необхідно застосовувати квазітривимірні моделі як просторову суперпозицію полів окремих стрижнів [5] або виконувати тривимірне моделювання [2].

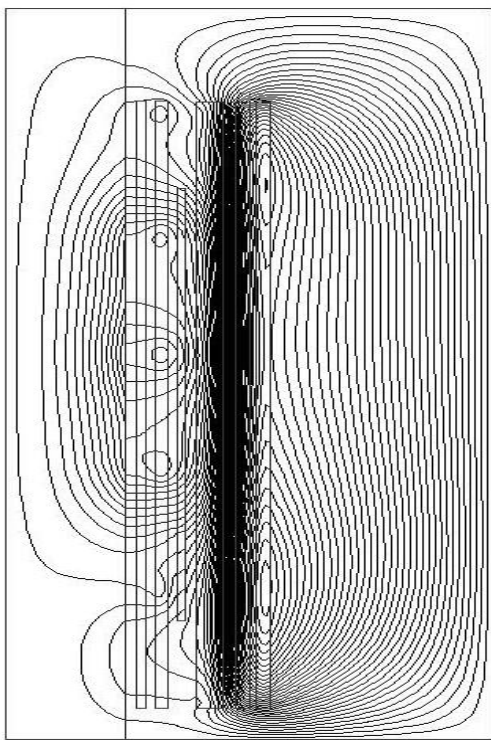


Рис. 3

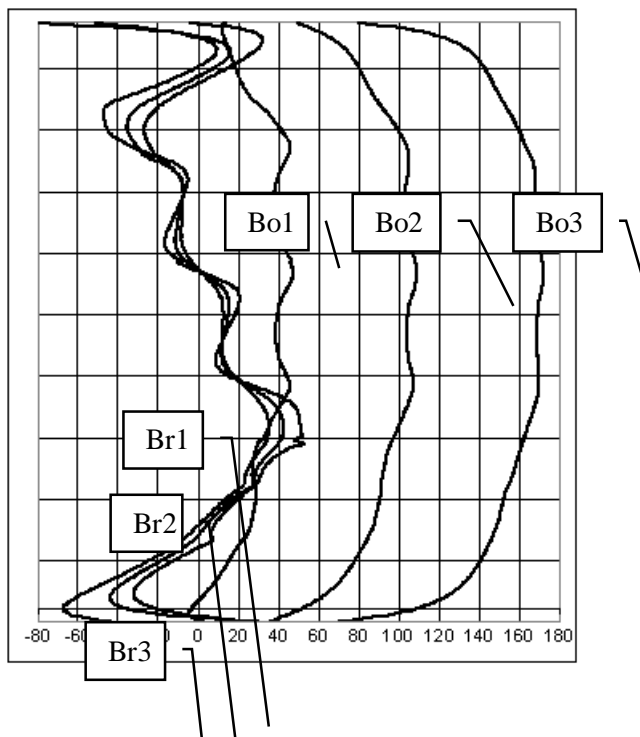


Рис. 4

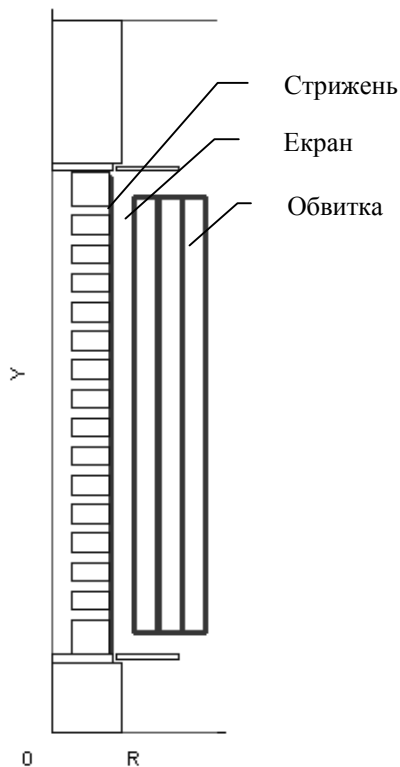


Рис. 5

Розподіл нормальній до поверхні стрижня індукції магнетного поля розсіяння силового трансформатора, розрахований з використанням відкритої плоскопаралельної моделі [3], показаний на рис. 6. Даний розподіл може бути використаний для подальшого розрахунку вихрових струмів і втрат, як у пресувальній пластині стрижня МС, так і в смугах електростатичного екрану. Для розрахунку магнетного поля реактора розглянута плоскомеридіанна розрахункова модель у вікні МС, яка показана на рис. 5.

Модель містить феромагнетні елементи стрижня МС, торцевих ярем, радіальних шунтів на краях обвитки, яка представлена трьома концентрами, розділеними один від одного вертикальними охолоджуючими каналами. Розрахунок виконано по методиці, детально наведеній в [5], з використанням комбінації аналітичного методу у вигляді рядів Фур'є-Бесселя для поля обвитки без стрижня і чисельного методу інтегральних рівнянь для врахування дискретних феромагнетних елементів. На рис. 6 представлено розподіл нормальній до поверхні смуги екрану на стрижні МС індукції магнетного поля реактора. Епюра поля носить характер, що різко змінюється. Максимальне значення поля проти торців обвитки складає 0.657 Тл.

**Розрахунок вихрових струмів.** Пряме моделювання задачі (4)–(5) для потенціалу  $U$  вихрових струмів в плоскій пластині в ПЗ ANSYS/Emag3D відсутнє. Тому з використанням елементу PLANE53 2D 8-Node Magnetic Solid застосовано моделювання рівняння (4) як аналога рівняння (2) з визначенням правої частини рівняння через задане розподілене поле збудження на всій поверх-

хні пластини [1]. Умова Діріхле (5) забезпечується завданням рівності нулю потенціалу на границі пластини.

Оператори елемента PLANE53 дозволяють врахувати як довільний двовимірний розподіл поля збудження на поверхні тонкої немагнетної пластини, так і можливий складний геометричний контур її границі  $G$ , у тому числі – внутрішні розрізи в пресувальній пластині. За допомогою розробленого макросу для елемента PLANE53 формується крайова задача (4)–(5) із завданням правої частини рівняння (4) через поле  $B_n = f(x, y)$ . За наслідками розв'язання крайової задачі за допомогою виразу (7) обчислюється розподіл поверхневої густини втрат  $w = f(x, y)$  і загальних втрат в розрахунковій моделі провідної пластини.

При розподілі магнетного поля (рис. 6) на верхній половині пресувальної пластини силового трансформатора на рис. 7 показано вектори щільності поверхневих струмів, а на рис. 8 – інтенсивність поверхневих втрат як результат чисельного моделювання.

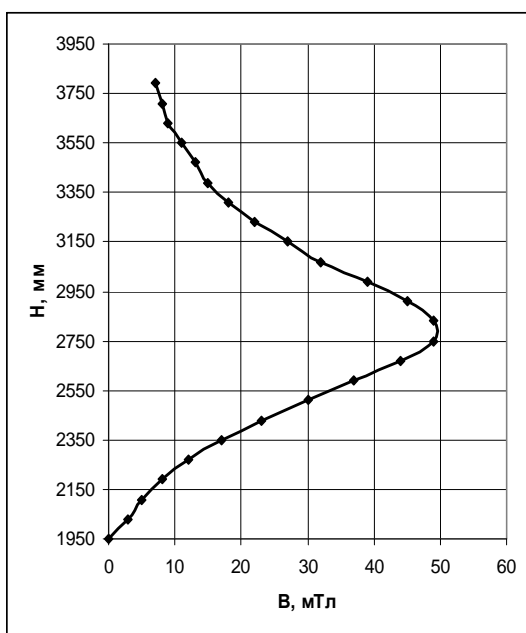


Рис. 6

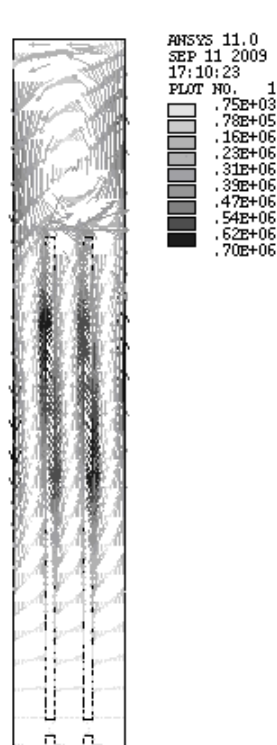


Рис. 7

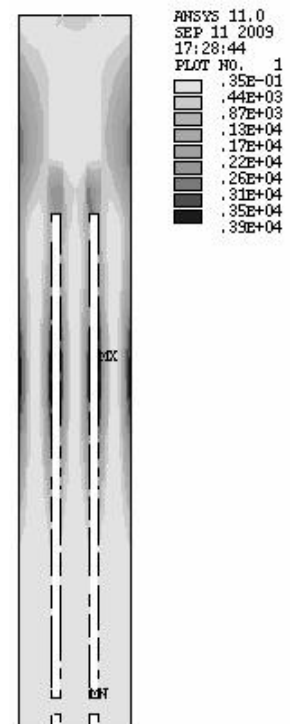


Рис. 8

Як видно з результатів розрахунку, максимальні значення вихрових струмів (втрат, нагрівів) найбільші на вертикальних краях окремих смуг в зоні проти торця обвитки. Інтенсивність вихрових струмів у цій зоні обумовлена, з одного боку, найбільшою величиною поля збудження, а з другого боку – зменшеним розміром окремої смуги пресувальної пластини. Вище за початок вертикальних розрізів в пресувальній пластині (в зоні торцевого яра) інтенсивність поля зменшена приблизно в три рази, проте позначається (у квадраті) загальна ширина пластини. Тому вихрові струми в цій області яра і у області торця обмотки майже співрозмірні.

Як зазначалось раніше, епюри магнетного поля на поверхні провідних смуг трансформатора і реактора відрізняються. Для реактора – це епюри з числом переходів, яке визначається числом повітряних проміжків в стрижні МС. По полю, показаному на рис. 9, із застосуванням описаної процедури в ANSYS\Emag3D одержано розподіл вихрових струмів по ширині і по висоті смуги екрану. Враховуючи їхню значну висоту, на рис. 10 (вектори струму) та на рис. 11 (щільність втрат) показаний фрагмент смуги у верхній частині екрану в зоні максимального значення магнетного поля навпроти верхнього торця обвитки та першого повітряного проміжку в стрижні МС.

Виконано також аналогічні розрахунки із застосуванням аналітичної методики, що наведена в [4]. Результати з допустимою похибкою відповідають одержаним із застосуванням методу чисельного моделювання.

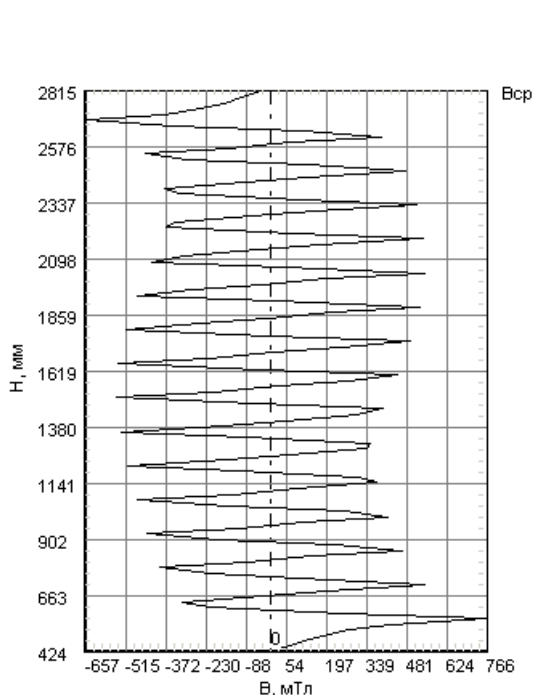


Рис. 9

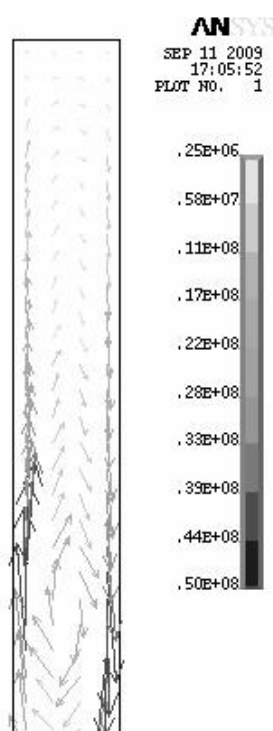


Рис. 10

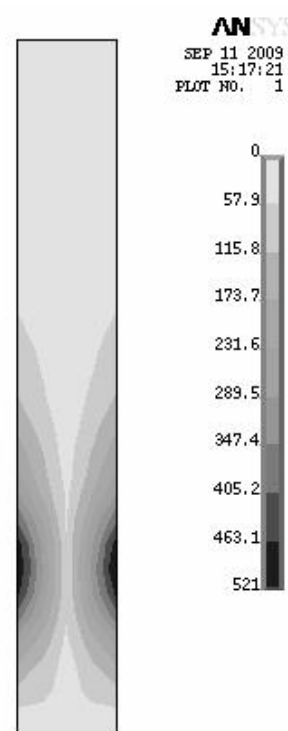


Рис. 11

**Оцінка нагріву.** Оцінка нагріву пресувальної пластини може бути виконана по методиці, що наведена в [9]. Розрахунок нагрівів провідних смуг електростатичного екрану реактора в даній роботі проведено згідно з прийнятими в [11,12] спрощеннями. Розглядається нагрів ділянки смуги електростатичного екрану з найбільшими поверхневими втратами на вертикальному краю смуги. Не враховується теплопровідність по ширині і по довжині смуги. Вважається, що теплообмін з охолоджуючим маслом відбувається з одного боку (другий бік, від стрижня, ізолюваний картоном). Спрощений коефіцієнт тепловіддачі, використаний в [11,12]  $\alpha = 100 \text{ Вт/м}^2/\text{}^\circ\text{С}$ , замінений на вираз, який визначений на підставі експериментальних даних для умов природної циркуляції масла у вертикальному каналі у вигляді функції, залежної від усереднених  $q_s$  поверхневих втрат по висоті ділянки –  $\alpha = 4.3q_s^{0.4}$ .

За конструктивними даними досліджуваного реактора потужністю 60 МВ.А діаметр екрану 616 мм, висота 2415 мм, ширина окремої провідної смуги екрану 25 мм, товщина смуги 0.02 мм, товщина ізоляції екрану на одну сторону 1 мм. Питомий опір матеріалу екрану рівний питомому опору провідного шару – алюмінію, тобто  $\rho = 0,028 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ . Теплопровідність просоченого маслом ізоляційного картону  $\lambda = 0,3 \text{ Вт/м}^0\text{С}$ . Тепловий опір екрану з односторонньою ізоляцією  $R = d / \lambda$ .

Для дослідженого випадку максимальна поверхнева густина теплового потоку на краю верхньої ділянки смуги (рис. 11) складає  $q = 521 \text{ Вт/м}^2$ , усереднені втрати на ділянці  $q_s = q / 2 = 260.5 \text{ Вт/м}^2$ . При цьому  $\alpha = 39.8 \text{ Вт/м}^2/\text{}^\circ\text{С}$ . Перевищення температури екрану над маслом  $\Delta t_3 = q / \alpha = 13.1 \text{ }^\circ\text{С}$ . Перепад температури в ізоляції  $\Delta t_{II} = q R = 1.7 \text{ }^\circ\text{С}$ . Перевищення температури екрану над температурою масла в місці розташування розрахункової ділянки  $\Delta t = \Delta t_3 + \Delta t_{II} = 14.8 \text{ }^\circ\text{С}$ . Вказане значення в сумі з температурою масла в верхній частині бака реактора не повинно перевищувати норм нагріву целюлозної ізоляції екрану. У даній конструкції такі норми забез-

печені, що визначає можливість застосування розглянутого екрану для реактора 60 МВ.А і для інших реакторів з подібними конструкціями електростатичних екранів і інтенсивністю магнетного поля.

**Висновки.** Запропоновані методики забезпечують практичні розрахунки магнетного поля, вихрових струмів, втрат і оцінку нагрівів у пресувальних пластинах та в провідних смугах електростатичних екранів, розташованих на стрижнях магнетної системи трансформатора і шунтувального реактора.

1. *Басова А. В., Іванков В. Ф., Кокошин С. С., Химюк І. В.* Численное моделирование вихревых токов, нагретов в конструктивных элементах из немагнитной стали трансформаторов и электрических реакторов. // XIII Междун. науч.-техн. конф. "Теоретическая электротехника" ISTET '05. Львов, 4-7 июля, 2005г. – Львов, 2005. – С. 52–54.
2. *Басова А.В., Жук В.В., Іванков В.Ф., Кокошин С.С., Химюк І.В.* Анализ электромагнитных и механических процессов в силовых трансформаторах и реакторах методом конечных элементов // Техн. електродинаміка. Тем.випуск «Проблеми сучасної електротехніки». Ч. 3. – 2008. – С. 9–14.
3. *Іванков В.Ф., Нижник Л.П.* Математические модели электромагнитных полей в трансформаторах. // В кн.: Математические проблемы энергетики. – Киев: Наукова думка. – 1988. – С. 50–63.
4. *Іванков В.Ф.* Математические модели к расчету вихревых токов в элементах конструкции из немагнитной стали трансформаторов и электрических реакторов. / Праці ІЕД НАН України. Електродинаміка. – Київ. – 2001. – С. 9–25.
5. *Іванков В.Ф.* Расчет магнитного поля, потерь в баках трансформаторов и электрических реакторов. // Праці ІЕД НАН України. – 2001. – №1(10). – С. 91–104.
6. *Лурье С.И.* Расчет вихревых токов в тонкой пластине для определения добавочных потерь в трансформаторах и реакторах.// Электричество. – 1968. – № 6. – С. 80–82.
7. *Степанов А.Е., Блаудзевич Ю.Г., Борукаев З.Х., Рапцун Н.В., Сикора Р.А., Гаврильчик К.К., Грамс М.М., Гратковски С.М., Зюлковски М.Т.* Моделирование электромагнитных полей в электротехнических устройствах. /Под редакцией А. Степанова и Р. Сикоры. – К.: Техніка, 1990. – 188 с.
8. *Морозов Д.Н.* Расчет общих и местных потерь в пластинах, принизываемых потоком рассеяния трансформатора или реактора.// Электричество. – 1967. – №12. – С. 32–38.
9. *Морозов Д.Н.* Нагрев вставок стержневого реактора от потоков выпучивания // Вопросы трансформаторостроения. Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1969. Вып.79. – С. 192–205.
10. ANSYS/Structural/Emag3D. Лицензия ОАО «ЗТР».
11. *Kirch H.J., Krause Ch., Schneider E., Schultz K.* Development of a new flexible shield for application in power transformers // International symposium on high voltage engineering. Yokohama, Japan (august 23–27, 1993). Paper No. 68.02, 1993. – Pp. 205–208.
12. *Moser H.P., Dahinden V.* Transformerboard 11 // Weidmann Ltd., Rapperswil, 1987. – Pp. 34–52.

Надійшла 15.09.09