

**ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ
НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
ПРОЦЕСІВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ**



Предмет, об'єкт і мета дослідження

Предметом дослідження є моделювання електричних і електромагнітних процесів в потужних генераторних і розподільчих трансформаторах, які працюють у складі високовольтних силових мереж. Загальною фундаментальною проблемою, на вирішення якої спрямовано проект, є підвищення якості електричної енергії в високовольтних мережах.

Об'єктом дослідження є нестаціонарні електромагнітні процеси, які протікають в магнітній системі трифазного трансформатора, а також в магнітних системах групи однофазних трансформаторів та їх вплив на перехідні процеси в високовольтній силовій мережі.

Конкретною фундаментальною задачею, вирішення якої передбачається в рамках загальної проблеми, є розробка нової концепції моделювання електромагнітних процесів в електричних і магнітних колах трансформаторів, метою якого є аналіз складних нестаціонарних режимів роботи системи «генератор – трансформатор – силова мережа».

Головною метою роботи є наукове обґрунтування необхідності і розробка нового методу дослідження нестаціонарних процесів в магнітопроводах з ізотропних і анізотропних феромагнітних матеріалів і створення на цій основі єдиного методологічного підходу до аналізу процесів в трансформаторах, що працюють у складі силової мережі. Метод може бути використаним при моделюванні реакторів, вимірювальних трансформаторів струму і напруги, імпульсних і перетворювальних трансформаторів. Розроблений підхід поширюється на суміжні галузі науки, зокрема загальну теорію нелінійних електричних і магнітних кіл, вивчення нелінійних властивостей феромагнітних матеріалів.

Проект було спрямовано на вирішення задачі врахування і відтворювання на рівні моделі додаткових (аномальних) втрат енергій в листах електротехнічної сталі, що використовується в магнітних системах (МС) трансформаторів різноманітного типу і призначення. Для реалізації поставленої мети були розв'язані наступні задачі:

§ розроблена нова концептуально проста модель гістерезису з пам'яттю, здатна відтворювати гістерезисні петлі складної форми;

§ удосконалена модель перемагнічування тонкого листа у випадку ізотропних електротехнічних сталей;

§ розроблено метод урахування магнітного гістерезису, вихрових струмів та магнітної в'язкості в магнітних системах трансформаторів на основі моделі тонкого листа;

§ розроблено метод ідентифікації параметрів схем магнітних систем трансформаторів різних конструкцій, з урахуванням шляхів замикання магнітного потоку поза магнітопроводом;

§ розроблено метод урахування впливу баку трансформатора та стиків шихтованої магнітної системи.

Принцип побудови інверсної моделі гістерезису

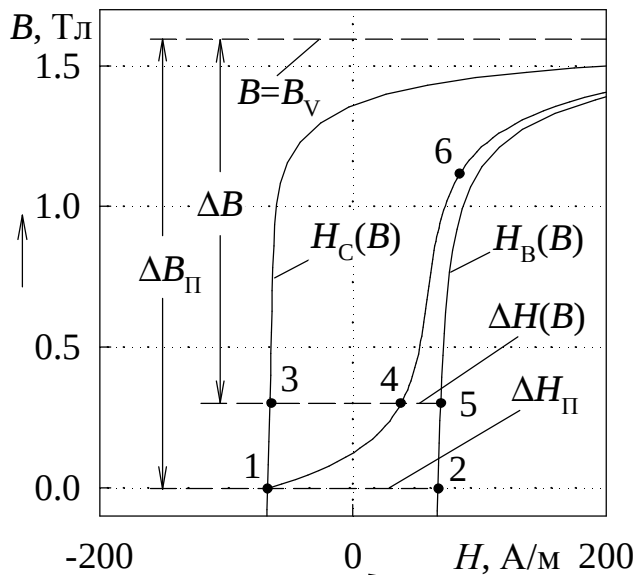


Рис. 1

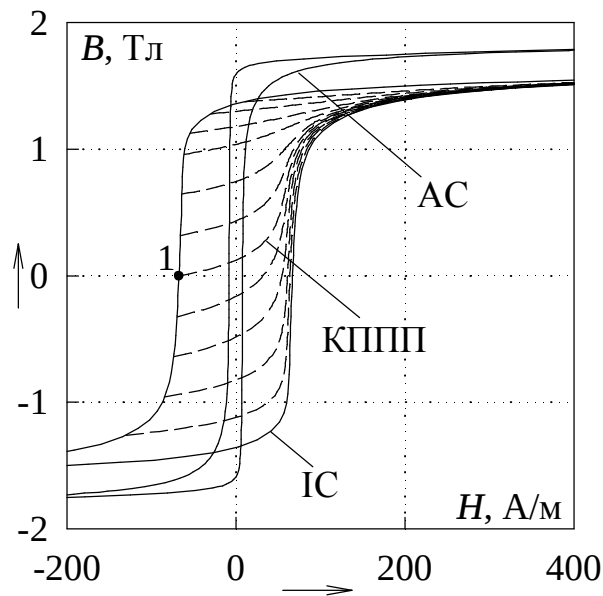


Рис. 2

Визначення поточної координати кожної точки кривої повернення першого порядку (КППП), наприклад, точки 4, що лежить на заданому рівні, провадиться шляхом визначення відступу точки 4 від точки 5, що лежить на висхідній гілці зовнішньої петлі:

$$H_T(B_T) = H_B(B_T) - DH(B_T).$$

$$\text{Тут } DH(B_T) = DH_{\Pi}(1-D) \cdot x \cdot e^{-a(1-x)} + D \cdot DH_{BH}(B_T) \cdot x^g,$$

$$x = DB / DB_{\Pi}, \quad DB_{\Pi} = B_V - B_{\Pi}, \quad DH_{\Pi} = H_B(B_{\Pi}) - H_C(B_{\Pi}),$$

$DH_{BH}(B_T) = H_B(B_T) - H_C(B_T)$ - це ширина зовнішньої петлі на рівні B_{Π} і B_T (на рис. 1 - це довжина відрізка 3-5), а величини D , a і g - це параметри моделі, що настраюються.

Наближення розрахункових КППП до експериментальних провадилося спочатку окремо для кожної КППП і проводилося шляхом мінімізації функції цілі

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (H_e(B_i) - H_T(B_i, \mathbf{x}))^2$$

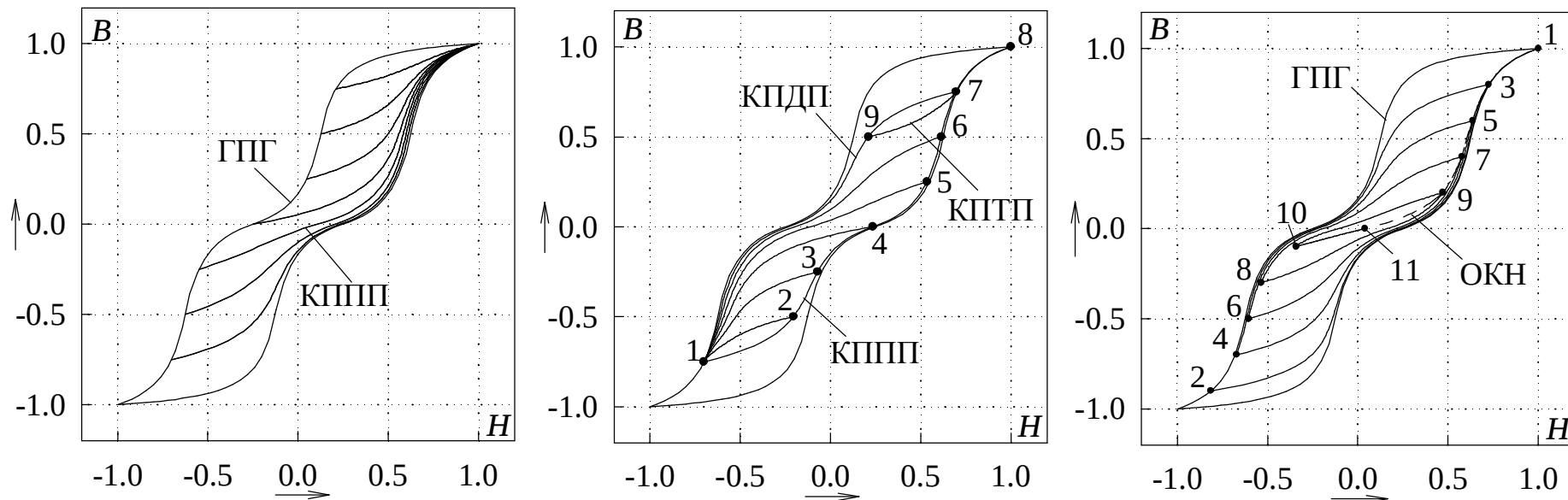
де $H_e(B_i)$ - експериментальна КППП; $H_T(B_i)$ - розрахункова КППП; $\mathbf{x} = [D, a, g]$ - вектор змінних, що варіюються.

Почергове налаштування моделі на кожну з експериментальних КППП, показаних на рис. 2, і подальша апроксимація отриманих значень привела до таких параметрів $D = 0.22(1-b)$, $g = 0.125$,

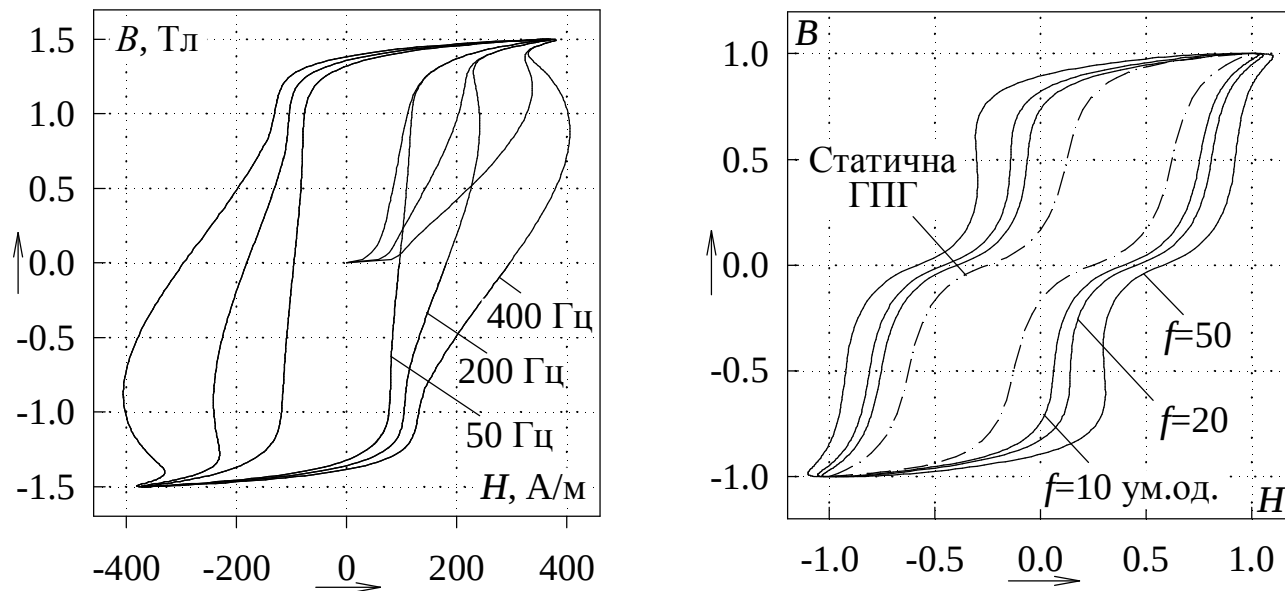
$$a = DB_{\Pi} \left(7.73 + 2.76b - 28.63b^2 + 28.36b^3 \right), \quad b = DB_{\Pi} / DB_{BH},$$

де ΔB_{BH} - висота зовнішньої петлі.

Результати моделювання кривих намагнічування матеріалу із складною формою граничної петлі



Перевірка працездатності моделі при розв'язанні рівнянь Максвелла



Динамічна модель ділянки магнітної системи

Відповідно до принципу розподілу загальних втрат на перемагнічування W на складові $W = W_{\Gamma} + W_{\text{КЛАС}} + W_{\text{Д}}$ магнітне поле $H(t)$ на поверхні феромагнітного листа може бути представлено сумою гістерезисної, класичної й додаткової складових: $H(t) = H_{\Gamma} + H_{\text{КЛАС}} + H_{\text{Д}}$. Однією з форм такого представлення є модель тонкого листа (МТЛ)

$$H(t) = H_{\Gamma}(B) + \frac{d^2}{12r} \frac{dB}{dt} + g(B) d \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1/2}$$

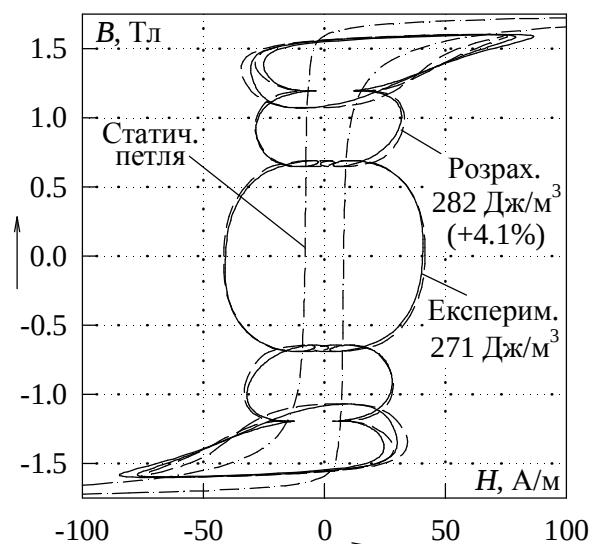
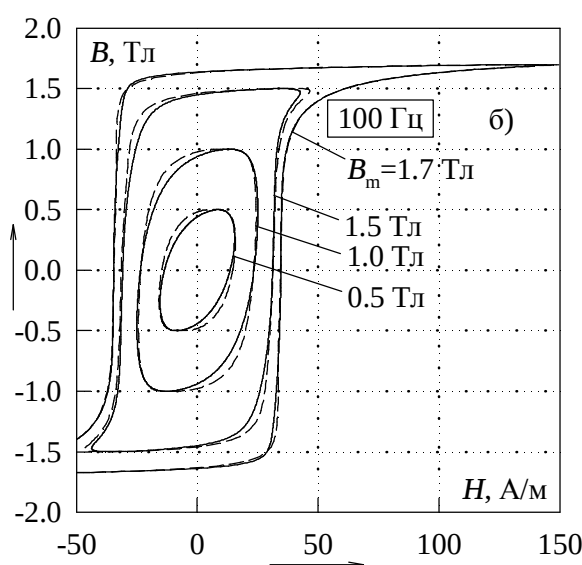
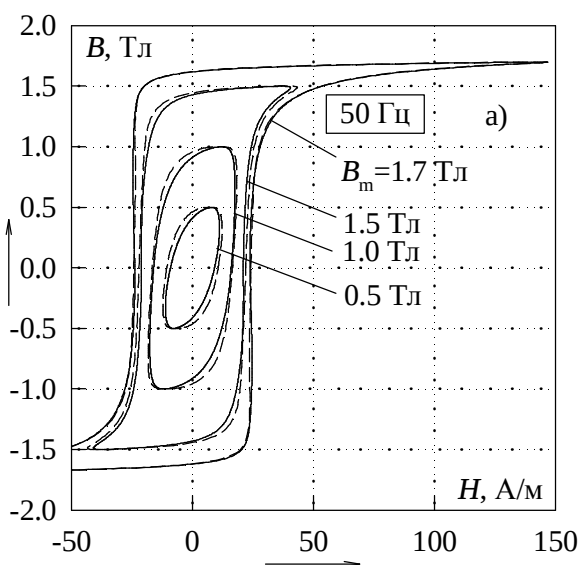
де поле $H_{\Gamma}(B)$ розраховується з використанням статичної моделі гістерезису, а $g(B)$ може бути або константою, або функцією B . Параметр напрямку δ для висхідної ($dB/dt > 0$) і спадної ($dB/dt < 0$) кривих намагнічування дорівнює, відповідно, ± 1 . Для холоднокатаної електротехнічної сталі М4 ($d = 0.255$ мм, $\rho = 0.48 \cdot 10^{-6}$ Ом·м)

знайдено

$$g(B) = \begin{cases} G_m (1 + a_1 B_d^2 + b_1 B_d^4), & \text{при } B < 0, \\ G_m (1 + a_2 B_d^2 + b_2 B_d^4), & \text{при } B \geq 0. \end{cases}$$

Тут $a_1 = 0.103 \text{ 1/Тл}^2$, $b_1 = 0.165 \text{ 1/Тл}^4$, $a_2 = 0.191 \text{ 1/Тл}^2$, $b_2 = 0.049 \text{ 1/Тл}^4$, $G_m = 0.443 \text{ (А/м)} \cdot (\text{с/Тл})^{1/2}$, $B_{\delta} = B \delta$

Результати порівняння розрахункових (пунктирні лінії) і експериментальних (суцільні лінії) динамічних петель при синусоїдальній та при модульованій індукції



Модель перемагнічування ізотропної електротехнічної сталі в перехідному режимі

Вище розглянута МТЛ добре зарекомендувала себе для анізотропних і ряду ізотропних електротехнічних сталей з високим вмістом кремнію (5-6%). Однак, МТЛ виявляється непридатною для моделювання ізотропних сталей зі вмістом кремнію до 2%, що мають відносно низький питомий опір. Тому для ізотропних сталей було запропоновано поліпшену модель (МТЛ-П), яка записується у вигляді

$$H(t) = H_r(B) + \frac{d^2(B - B_p)}{8rB_s} \frac{dB}{dt} + g(B) \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1/a(B)}$$

де B_p – значення індукції в точці реверса, тобто в точці, де міняє знак похідна dB/dt ; B_s – варійований параметр.

Для заданого B_s залежності $g(B)$ і $a(B)$ настраюються так, щоб петлі, розраховані для фіксованої амплітуди B_m , були максимально наближені до петель, обміряних на 3-4 частотах. Після порівняння експериментальних і розрахованих залежностей втрат від частоти при необхідності проводиться корекція значення параметра B_s , і

вищеописана процедура налаштування параметрів і повторюється. З використанням запропонованого алгоритму було проведено налаштування параметрів МТЛ-П для 2 ізотропних сталей, параметри яких наведені в табл. 1, де H_c – коерцитивна сила; B_r – залишкова індукція. Залежності параметрів в'язкості цих сталей наведені на рис. 3.

Таблиця 1 – Параметри сталей

Сталь	ρ , мкОм·м	d , мм	H_c , А/м	B_r , Тл
Сталь І1	0.260	0.5	41.3	1.265
Сталь І3	0.430	0.5	67.2	1.36

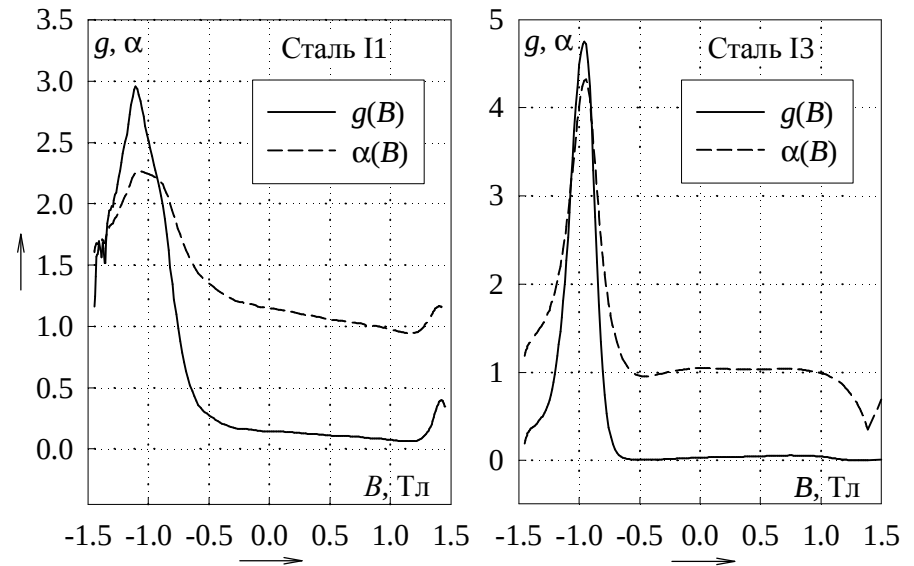
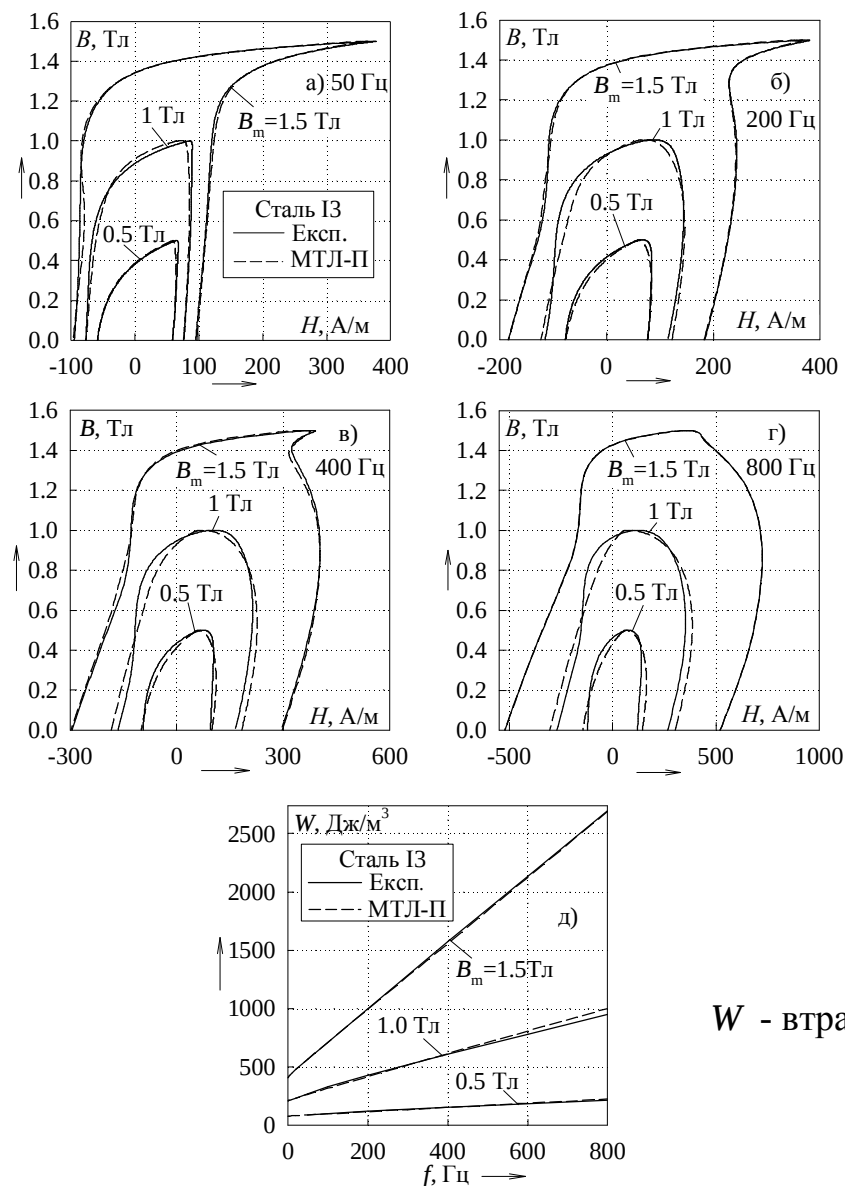


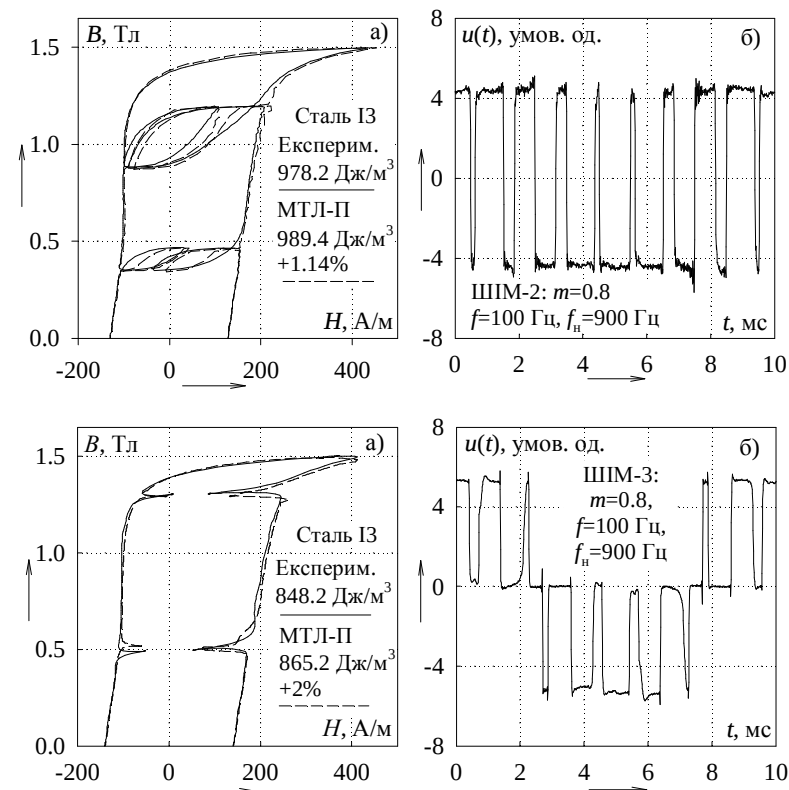
Рис. 3

Результати моделювання динамічних петель намагнічування ізотропної сталі ІЗ

Синусоїдальна напруга



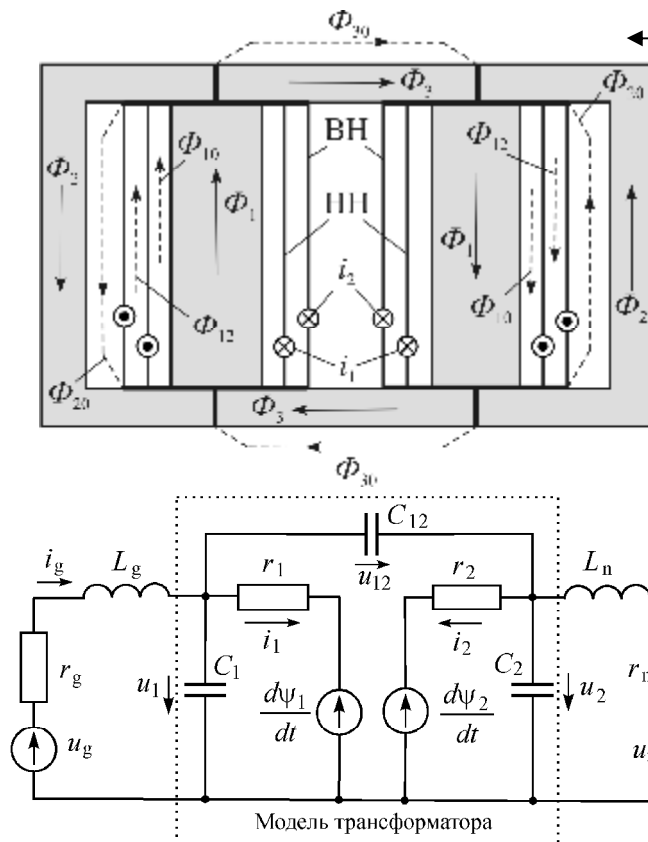
Напруга з широтно-імпульсною модуляцією



W - втрати енергії на перемагнічування

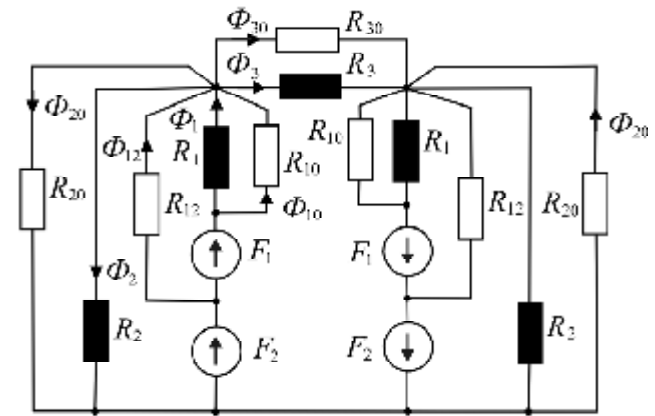
Розробка оборотних топологічних моделей трансформаторів

Розроблено моделі трансформаторів всіх основних типів, а саме однофазного три-стрижневого, однофазного чотиристрижневого, трифазного тристрижневого і трифазного п'ятистрижневого. Відмінними рисами моделей є їх реверсивний характер та врахування топології осердя і обмоток. Завдяки врахуванню магнітних потоків в немагнітному середовищі моделі адекватно відтворюють процеси підключення трансформатору до мережі як з боку високої напруги (ВН), так і з боку низької напруги (НН). Розроблені моделі охоплюють всі режими роботи трансформатора, починаючи з холостого ходу (ХХ) і закінчуючи коротким замиканням (КЗ). Модель однофазного чотиристрижневого трансформатора було включено до складу трифазної трансформаторної групи. Побудовані перехідні процеси і досліджено взаємний вплив трансформаторів групи в режимі підключення до мережі. Нижче показані приклади моделей трансформаторів.



← Магнітне коло однофазного чотиристрижневого трансформатора та його схема заміщення.

Зафарбовані елементи відповідають феромагнітним ділянкам, нелінійні магнітні властивості яких описуються МТЛ. Незафарбовані елементи – це магнітні опори повітряних (масляних) каналів.



← Схема заміщення електричного кола трансформатора, що була використана для тестування моделі.

Модель трифазного п'ятистріжневого трансформатора ТДЦ-667000/500

Магнітне коло трансформатора

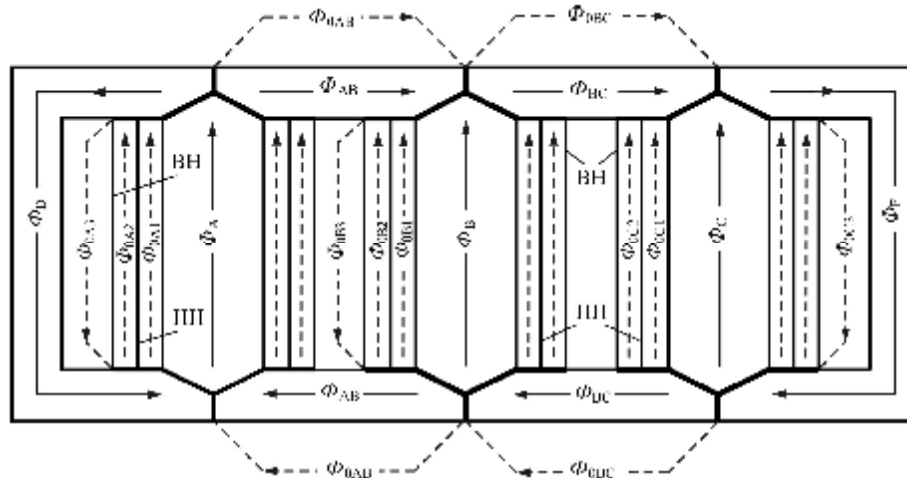
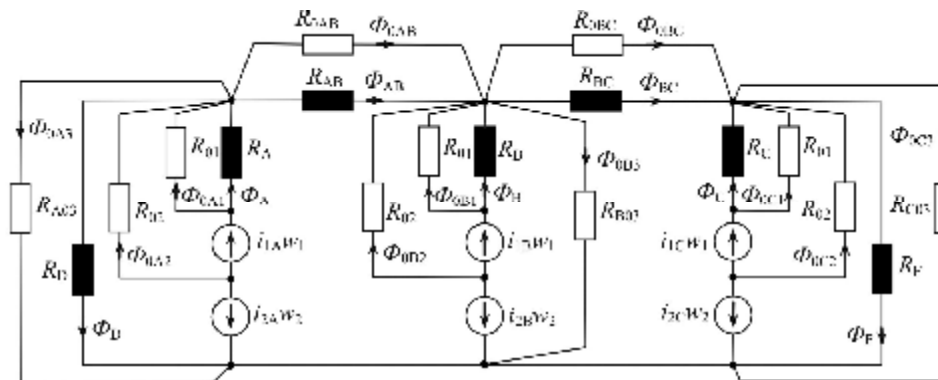
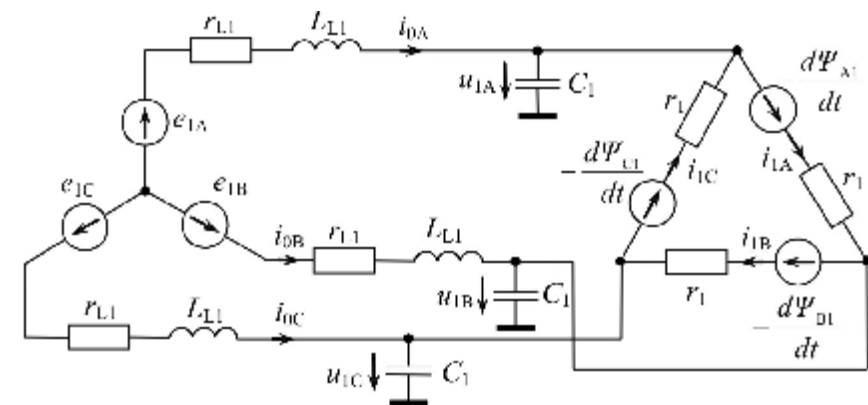


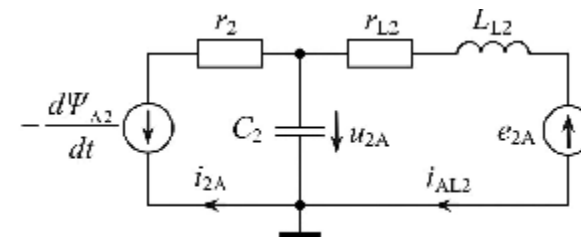
Схема заміщення магнітного кола



Схему заміщення електричного кола НН



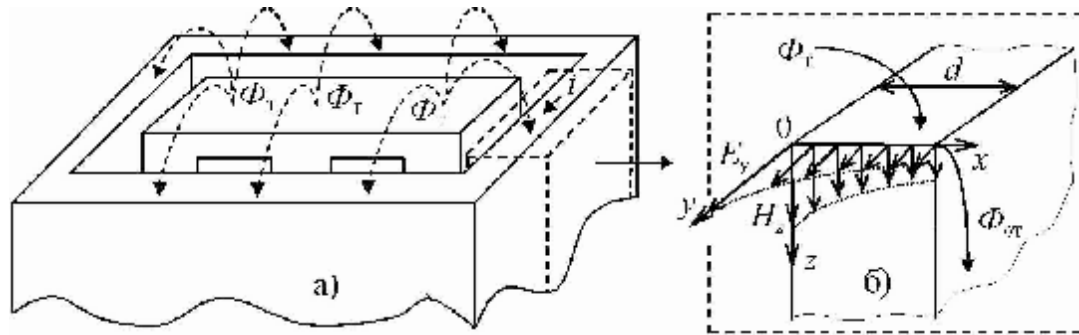
Схему заміщення однієї фази електричного кола ВН



Модель масляного бака трансформатора

Розроблено спосіб урахування впливу феромагнітного бака трансформатора, який утворює шлях для магнітного потоку нульової послідовності. Запропоновано поєднати топологічну модель трансформатора, яка розглядається як система з зосередженими параметрами, і модель стінок бака, що є елементом з розподіленими параметрами.

Проникнення магнітного поля в центральний пояс бака



Рівняння (1) зводиться до системи звичайних диференціальних рівнянь відповідно значень індукції у вузлах сітки

$$\frac{dB_1}{dt} = \frac{8H_2 - 7H_1 - H_3}{2h^2s} + \frac{3}{h}E_1,$$

$$\frac{dB_k}{dt} = \frac{H(B_{k-1}) - 2H(B_k) + H(B_{k+1}))}{sh^2}, (k = 2, \dots, n-1)$$

$$\frac{dB_n}{dt} = \frac{8H_{n-1} - 7H_n - H_{n-2}}{2h^2sK_n(B_n)}, \quad K_n(B_n) = 1 + \frac{3h_T}{hR_{0T}l_Tm_d(B_n)}$$

Щоб об'єднати рівняння Максвелла

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = s \frac{\partial B}{\partial t}$$

зі звичайними диференціальними рівняннями трансформатора, зручно ввести рівномірну сітку на відрітку осі x з вузлами від x_1 на внутрішній поверхні стінки до x_n на її зовнішній поверхні. Крок сітки $h=d/(n-1)$. Граничні умови Неймана на цих поверхнях ($-\partial H_1/\partial x = sE_1$ і $-\partial H_n/\partial x = sE_n$) визначаються величинами напруженостей електричного поля E_1 і E_n у першому й останньому вузлах:

$$E_1 = \frac{1}{l_T} \cdot \frac{d\Phi_T}{dt}; \quad E_n = \frac{1}{l_T} \cdot \frac{d\Phi_{0T}}{dt}$$

Потік Φ_{0T} , що виходить за зовнішню стінку бака, залежить від магнітного опору R_{0T} простору, що оточує бак, і висоти h_T центрального поясу бака:

$$\Phi_{0T} = H_n(B_n)h_T / R_{0T}$$