

## ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕННЯ КРИВИХ НАМАГНІЧУВАННЯ МАГНІТНИХ ОСЕРДЬ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

*М. М. Лутчин, асп.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

*вул. Політехнічна, 37, 03056, м. Київ, Україна*

*E – mail: 007001@mail.ru*

Запропонований спосіб побудови моделі кривих намагнічування на прикладі електротехнічної сталі E330A, яка застосовується в трансформаторах струму, зменшує обсяги програмного забезпечення, скорочує обсяги зберігання інформації, створює можливість організації бібліотек кривих намагнічування різних типів сталей з різноманітними формами та розмірами магнітопроводів, спрощує формат роботи з характеристиками кривої намагнічування.

**Ключові слова:** трансформатор струму, крива намагнічування, гістерезис, вейвлет–перетворення.

**Вступ.** Розробка нових моделей, які адекватно відображають процес магнітного гістерезису, актуальна на сьогоднішній день, оскільки жодна з уже існуючих не може вважатись універсальною [1].

Форма кривої намагнічування є однією з найважливіших характеристик, суттєво залежить від хімічного складу речовини, його структурного становища та температури, від характеру й розподілу дефектів у дослідному зразку, а відповідно від особливостей технології його виготовлення [2] та наступного фізичного оброблення/впливу (теплого, механічного, термомагнітного та ін.). У той же час у довідниках та ДСТУ наведені тільки граничні значення магнітної індукції для деяких фіксованих значень напруженості поля, а самі криві отримані як середні значення гістерезисних циклів без урахування конструкції апарату та розсіювання. Технологічні відхилення як при виробництві сталі, так і при виготовленні самих трансформаторів струму, призводить до того, що при використанні основних кривих намагнічування присутня похибка, що не залежить від самої побудови моделі кривої та її подальшого використання. Тому й результати практичних замірів також не однозначні при оцінюванні точності.

**Аналіз попередніх досліджень.** На практиці при моделюванні й аналізі феромагнітних пристроїв використовують різноманітні методи апроксимації кривих намагнічування. Так, використовуючи апроксимацію функції гіперболічним синусом, здійснюється прив'язка до дійсної кривої по двом точкам і відповідно похибка відображення досить суттєва. Підвищення точності, в даному випадку, досягається лише шляхом оптимізації вибору коефіцієнтів апроксимації, введення різних поправок.

Використання сплайнів [3] для представлення залежностей  $H = f(B)$  та  $B = f(H)$  дозволяє повністю відтворювати будь-яку форму кривої, але при цьому точність у значній мірі залежить від кроку дискретизації залежності, що в свою чергу збільшує кількість розрахунків.

Враховуючи вищесказане, постає задача: використовуючи реальні криві намагнічування

різних типів сталей, розмірів та форм магнітопроводів, розробити модель  $H = f(B)$  та  $B = f(H)$ , що задовольняла б вимогам точності відтворення та простоти програмного опису.

**Мета роботи.** Використовуючи апарат вейвлет-перетворень, побудувати математичну модель кривих намагнічування магнітних осердь трансформаторів струму.

**Матеріал і результати дослідження.** Для дослідження властивостей ряду точок  $H = f(B)$  чи  $B = f(H)$  та встановлення відповідних залежностей між величинами, використаємо апарат кратномасштабного аналізу (Multiresolution analyses), який полягає у формуванні рядів значень, отриманих за рахунок зсувів та кратномасштабних копій вейвлетної функції. Вибірка отриманих вейвлет-коефіцієнтів дозволяє відокремити характерні особливості функції кривої намагнічування в області локалізації цих вейвлетів. Причому, чим більший масштаб має вибірка вейвлет-коефіцієнтів, тим більш точно визначається вид функції і тим менший буде вплив на результат [4].

При проведенні аналізу за допомогою дискретного вейвлет-перетворення основою є розрахунок вейвлет-коефіцієнтів. Для їх розрахунку переважно використовується апаратом кратномасштабного аналізу.

У загальному вигляді при відомих значеннях коефіцієнтів попереднього рівня розкладу наступний рівень може визначатися безпосередньо по них з урахуванням зміни нормуючого множника згідно формули:

$$C_{m-1,k} = (1/\sqrt{2}) (C_{m,2k} + C_{m,2k+1}), \quad (1)$$

де  $m$  – крок вейвлет-перетворення;  $k$  – порядковий номер значення на  $m$ -ому кроці перетворення;  $C_{m-1,k}$  – апроксимуючий коефіцієнт.

Крім апроксимуючих коефіцієнтів  $C_{m-1,k}$ , можуть бути визначені деталізуючі коефіцієнти:

$$D_{m-1,k} = (1/\sqrt{2}) (C_{m,2k} - C_{m,2k+1}). \quad (2)$$

Звідси слідує, що ряди, сформовані з коефіцієнтів  $C_{m-1,k}$  і  $D_{m-1,k}$ , містять повну інформацію, адекватну до інформації попереднього рівня, що дозволяє відновлювати повністю

початкові дані:

$$C_{m,2k} = (1/\sqrt{2})(C_{m-1,k} + D_{m-1,k}); \quad (3)$$

$$C_{m,2k+1} = (1/\sqrt{2})(C_{m-1,k} - D_{m-1,k}). \quad (4)$$

При цьому необхідно мати початково завершеною вибірку для розрахунку значень базисного вейвлет, до того ж початкова функція повинна утворювати при масштабуванні ортогональний базис [5].

Об'єм початкової вибірки даних має бути кратним  $2^m$ .

Для прикладу проаналізуємо дослідні дані електротехнічної сталі E330A (осердя  $\varnothing 910/790$ ) в області початкового намагнічування.

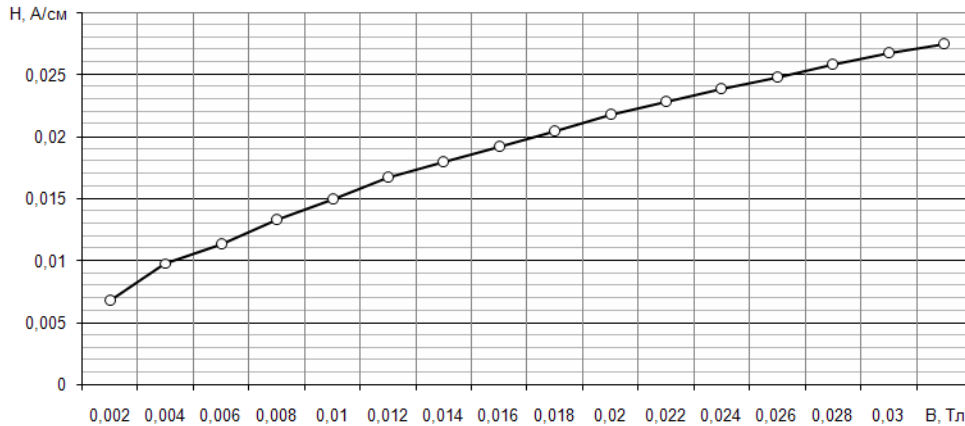


Рисунок 1 – Первинні додатні значення кривої намагнічування

Здійснюємо приведення отриманих дослідним шляхом (виміряних чи заданих) значень напруженості магнітного поля  $H$  до шкали  $B$  (тобто проводиться масштабування ряду значень напруженості магнітного поля  $H$  вздовж реальної вісі значень):

$$H'_i = \frac{H_i = f(B_i)}{B_i}, \quad (5)$$

де  $B_i$  – поточне значення магнітної індукції.

Далі застосуємо вейвлет-перетворення (кратномасштабний аналіз) до вибірки, що сформована зі значень напруженості магнітного поля  $H$ . У результаті обчислень отримуємо вибірку з 16 значень вейвлет-коефіцієнтів  $k$  (рис. 2).

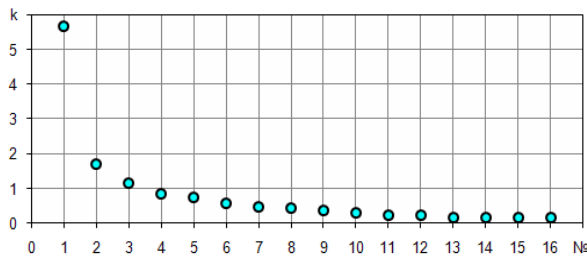


Рисунок 2 – Вейвлет-коефіцієнти, отримані в результаті перетворення кривої намагнічування

Як видно з рис. 2, крива, що утворюється при побудові всіх коефіцієнтів, носить гіперболічний характер. Оскільки перше розрахункове значення

*Алгоритм дослідження.* Виконаємо перший етап розрахунку – перетворення вихідного ряду значень точок кривої намагнічування в ряд вейвлет – коефіцієнтів. На першому кроці розбивається крива намагнічування  $H = f(B)$  вздовж вісі магнітної індукції  $B$  на 16 ділянок з кроком 0,002 Тл. Отримані результати представлені графічно на рис. 1.

*Примітка.* При збільшенні кількості ділянок, тобто зменшенні кроку, точність розрахунку значно збільшується.

різко відрізняється від загальної вибірки, його необхідно резервувати окремо.

Слід окремо зазначити, що величина даного першого коефіцієнта, з урахуванням масштабуючого коефіцієнта, пропорційна площі початкової фігури, яку утворює крива намагнічування (рис. 1).

Знайдемо рівняння гіперболи для перетвореної кривої намагнічування, виходячи із загального математичного виду:

$$y_i = \frac{a}{x_i} + b, \quad (6)$$

де  $x_i \in (2; 16)$  – порядковий номер вейвлет-коефіцієнтів;  $y_i$  – значення вейвлет-коефіцієнта  $k_i$ .

Сталі рівняння гіперболи  $a$  і  $b$  визначаються з урахуванням того, що кількість вейвлет-коефіцієнтів співпадає з кількістю початкових.

$$a = \frac{\sum \frac{y_i}{x_i} - \frac{1}{n} \sum y_i \sum \frac{1}{x_i}}{\sum \frac{1}{x_i^2} - \frac{1}{n} \left( \sum \frac{1}{x_i} \right)^2}; \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum \frac{1}{x_i}}{n}. \quad (8)$$

У результаті підстановки значень вейвлет-коефіцієнтів отримуємо наступне апроксимаційне рівняння первинної кривої намагнічування:

$$y_i = \frac{3,603}{x_i} - 0,043. \quad (9)$$

Після визначення сталих рівняння гіперболи виконуємо наступний етап розрахунку – відновлення даних до первинного виду залежності  $H = f(B)$ .

За допомогою останнього рівняння розраховуємо відновлені значення залежності.

Отримаємо ряд 15-ти значень (перше значення коефіцієнта необхідно використати з попередньо зарезервованої бази). Результати відновлення значень вейвлет-коефіцієнтів представлені на рис. 3.

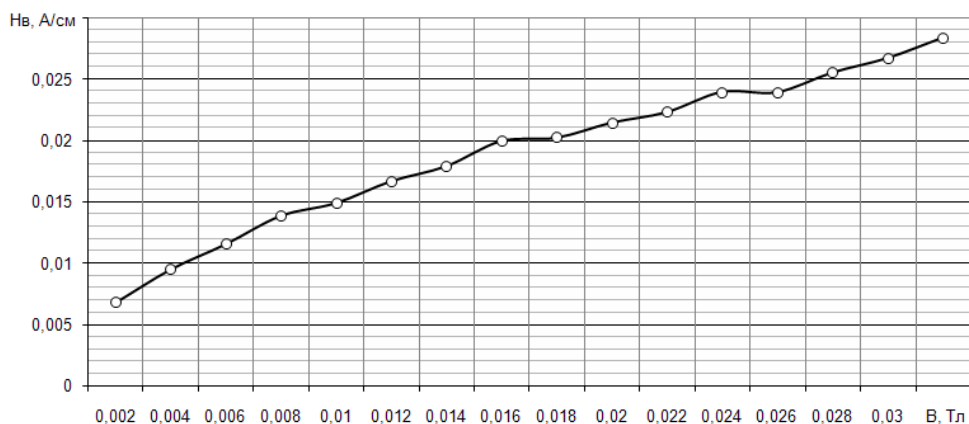


Рисунок 3 – Відновлені значення кривої намагнічування  $H = f(B)$

Отриманий ряд значень напруженості електромагнітного поля  $H_b$ , з урахуванням масштабування, порівнюємо з відповідними дійсними початковими значеннями ряду за допомогою визначення відносної похибки (табл. 1):

$$\varepsilon = \frac{H_i - H_{i(B)}}{H_i} 100\% \quad (10)$$

Для наочності представимо отримані значення відносної похибки відхилення відновлених даних у порівнянні з первинними вхідними значеннями табл. 1 у вигляді рис. 4.

Таблиця 1 – Результати вейвлет-перетворення кривої намагнічування електротехнічної сталі Е330А для сердечника Ø 910/790

№	Дослідне значення $H$ , А/см	Масштабоване значення $\hat{H}$	Коефіцієнт вейвлет-перетворення $k$	Відновлене значення $H_b$ , А/см	Відносна похибка $\varepsilon$ , %
1	0,0068	3,4	5,667	0,0068	0
2	0,00975	2,438	1,722	0,0095	2,458
3	0,0114	1,9	1,164	0,0116	-1,51
4	0,0133	1,663	0,847	0,0139	-4,33
5	0,015	1,5	0,75	0,0149	0,546
6	0,0167	1,392	0,59	0,0167	0,06
7	0,018	1,286	0,486	0,0179	0,502
8	0,0192	1,2	0,449	0,02	-3,95
9	0,0205	1,139	0,387	0,0202	1,33
10	0,0218	1,09	0,31	0,0215	1,59
11	0,0228	1,036	0,257	0,0223	2,146
12	0,0239	0,996	0,246	0,0239	-0,2
13	0,0248	0,954	0,189	0,0239	3,516
14	0,0258	0,921	0,185	0,0255	1,072
15	0,0268	0,893	0,178	0,0267	0,369
16	0,0275	0,859	0,173	0,0284	-3,11
				<b>max</b>	<b>3,516</b>
				<b>min</b>	<b>-4,33</b>

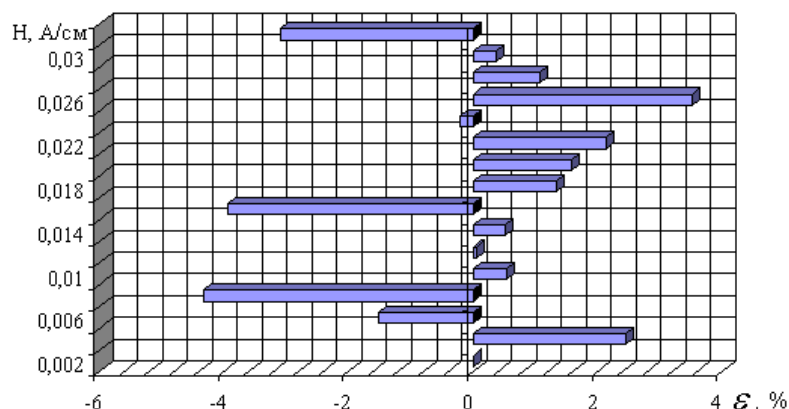


Рисунок 4 – Порівняння первинних та відновлених значень кривої намагнічування шляхом задавання похибки

**Висновки.** Розроблений метод представлення кривих намагнічування  $H = f(B)$  чи  $B = f(H)$  дозволяє моделювати їх на будь-яких ділянках. Характеризується наступними перевагами: відносною простотою та уніфікацією математичного апарату; високою точністю відтворення даних функції у порівнянні з існуючими методами та співрозмірністю з точністю сучасних вимірювальних приладів; спрощеним створенням, зберіганням та використанням бібліотек кривих намагнічування різних типів сталей з різноманітними формами та розмірами магнітопроводів у системах автоматичного проектування електротехнічних пристроїв та апаратів.

2. Власов В.Н. Исследование влияния технологии изготовления трансформаторов тока на характеристики намагничивания магнитопроводов // Техн. электродинамика. – 1982. – № 5. – С. 90–94.

3. Зирка С.Е., Мороз Ю.И. Инверсная модель магнитного гистерезиса // Техн. электродинамика. – 2010. – № 4. – С. 3–7.

4. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 464 с.

5. Попов А.О. Вейвлет-анализ дискретных сигналов для довольных масштабов // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2010. – № 2. – С. 16–23.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Соколов С.Е. Аппроксимация кривых намагничивания ферромагнитных устройств // Электричество. – 1991. – № 9. – С. 84–86.

Стаття надійшла 02.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

*Н. Н. Лутчин, асп.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
ул. Политехническая, 37, 03056, г. Киев, Украина  
E – mail: 007001@mail.ru.*

Предложен способ построения модели кривых намагничивания на примере электротехнической стали E330A, применяющейся в трансформаторах тока, который уменьшает объемы программного обеспечения, сокращает объемы хранения информации, создает возможность организации библиотек кривых намагничивания для разных типов сталей с разнообразными формами и размерами магнитопроводов, упрощает формат работы с характеристиками кривой намагничивания.

**Ключевые слова:** трансформатор тока, кривая намагничивания, гистерезис, вейвлет-преобразование.

## APPLICATION OF WAVELET-TRANSFORMATION TO THE MAGNETIZATION CURVES OF MAGNETIC CORE OF CURRENT TRANSFORMERS

*M. Lutchny, post-grad.*

*National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"  
vul. Polytechnichna, 37, 03056, Kyiv, Ukraine  
E - mail: 007001@mail.ru.*

The method of construction of model of magnetization curves is offered on the example of electrical engineering steel of E330A, that is used in the current transformers, that diminishes the volumes of software, abbreviates the volumes of storage information, creates possibility of organization libraries of magnetization curves for different types of steel with various forms and sizes of cores, simplifies the format of work with descriptions of magnetization curves.

**Key words:** current transformer, magnetization curves, hysteresis, wavelet-transformation.