

Д. М. Шостачук

## АПРОКСИМАЦІЯ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ ФЕРОЗОНДА

(Представлено доктором технічних наук, професором Самококіним Б.Б.)

В статті наведені деякі функції апроксимації кривої намагнічування ферозонда, зроблений аналіз точності апроксимації конкретної кривої намагнічування. За допомогою ЕОМ підібрані коефіцієнти до вибраної функції.

### 1. Особливості намагнічування феромагнітних матеріалів змінним магнітним полем

Неоднозначна залежність магнітної індукції  $B$  від напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$ , яка обумовлена гістерезисом, ускладнює аналіз роботи та розрахунок перетворювачів з феромагнітним осердям. Тому часто гістерезисом нехтують та користуються однозначною залежністю  $B(H)$ . У цьому випадку можна користуватися, наприклад, основною кривою, яка проходить через вершини окремих циклів намагнічування (на рис. 1 – крива 2). Вона мало відрізняється від початкової кривої намагнічування, яку отримують на попередньо розмагніченому зразку при повільному збільшенні напруженості зовнішнього поля.

Основна крива намагніченості добре відтворюється і тому використовується як найважливіша характеристика феромагнітного матеріалу. Нею користуються, наприклад, при розрахунках магнітних екранів та інших подібних пристроїв, які характеризуються усталеною робочою точкою по відношенню до зовнішнього поля, яке намагнічує феромагнітний матеріал. Однак в ферозондах які працюють у режимі, коли  $H_0 \ll H_m$ ,  $H_2 = 0$  [1], де феромагнітна речовина піддається циклічному перемагнічуванню по граничній або близькій до неї гістерезисній кривій, використання основної кривої намагнічування призводить до невідповідності розрахунків експериментальним даним. Значно кращі результати отримують у тому випадку, якщо використовують середню криву намагніченості (крива 1 на рис. 1). Її можна визначити таким чином [2]:

$$B(H) = \frac{B(H) \uparrow + B(H) \downarrow}{2}, \quad (1.1)$$

де стрілками відмічена належність значень індукції до зростаючої або знижуючої кривої граничної петлі гістерезису. Оскільки середня крива намагніченості є непарною функцією, вона може бути апроксимована поліномом непарних ступенів:

$$B = \sum_{i=1}^{\infty} a_{2i-1} H^{2i-1}, \quad (1.2)$$

де  $a$  – коефіцієнти апроксимації;  
 $i$  – цілі числа.

Вже при наявності трьох членів полінома можна отримати досить добре наближення апроксимуючої функції до дійсної залежності [2]. Вибір тої чи іншої апроксимації середньої кривої намагнічування обумовлюється особливостями завдань, які потрібно розв'язати, прийнятими допущеннями, простою математичного апарату та фізичною наочністю кінцевого результату.

### 2. Намагнічування феромагнітного матеріалу змінним та незмінним магнітними полями одночасно

Якщо до слабого незмінного поля, яке намагнічує феромагнетик, додати змінне, амплітуда якого змінюється від максимального значення, що забезпечує технічне насичення матеріалу, до нуля, то феромагнетик матиме індукцію, яка значно більше величини, що відповідала б основній (початковій) кривій намагнічування.

Змінне поле додає ту енергію, яка необхідна при змищенні меж доменів. Такий спосіб намагнічування називається безгістерезисним, або ідеальним, тому що змінне поле при зменшенні знищує явище гістерезису для незмінного поля. Крива, яку отримують при такому намагнічуванні, називається ідеальною (безгістерезисною). У тих випадках, коли періодичні

зміни магнітного опору осердя використовуються для вимірювання слабого магнітного поля, гістерезисні явища звичайно несприятливі, оскільки вони обумовлюють помилкові сигнали на виході пристрою – гістерезисне зміщення нуля.

Необхідною умовою відсутності цього явища є проходження змінного магнітного потоку, обумовленого струмом збудження, по всіх ділянках осердя, по яких проходить магнітний потік, викликаний вхідним (що вимірюється) сигналом. У цьому випадку достатнє за величиною змінне магнітне поле збудження здатне цілком усунути неоднозначну (гістерезисну) залежність магнітного стану осердя від вхідного сигналу [3].

Величина напруженості магнітного поля в космічному просторі на відстанях від земної кулі 20–22 тис. км складає приблизно 800 гам [4], або 0,64 А/м в одиницях СІ. Тому при обчисленні корисної електрорушійної сили (ерс) ферозонда відповідність отриманих аналітичних значень магнітної індукції реальним залежить, зокрема, від точності апроксимації середньої кривої намагнічування (1.2). Для вибраного матеріалу осердя – залізо-нікелевого сплаву 821М(П) найкраще користуватися безгістерезисною кривою намагнічування сплаву 79НМ [2], коерцитивна сила яких складає відповідно 20 та 64 А/м, індукція насичення 0,73 та 0,67 Тл (дані відповідають основній кривій намагнічування).

На рис. 1. наведені основна (2) та ідеальна (1) криві намагнічування для залізо-нікелевого сплаву 79НМ. Ідеальна крива намагнічування характеризується відсутністю точки перегину та досить високою магнітною проникливістю, яка для сплаву 79НМ при  $H = 0$  в 2000 разів більша початкової проникливості, що визначається за основною кривою [3].

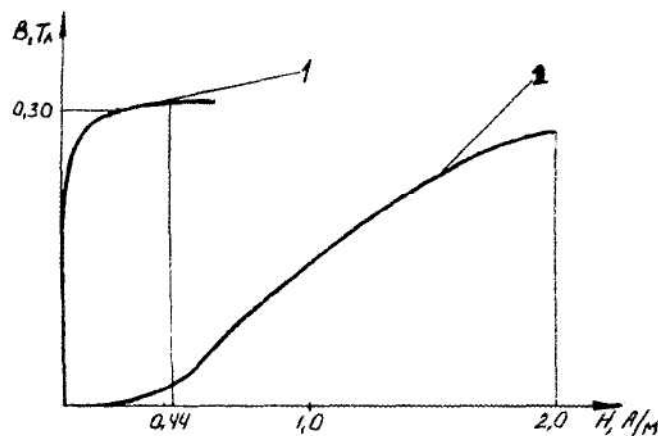


Рис. 1. Криві намагнічування сплаву 79НМ

Ідеальна крива досить близька до лінії, що проходить через середні точки горизонтальних хорд граничної симетричної петлі гістерезису, тобто до середньої кривої намагнічування (рис. 1 та (1.1)). Використання намагнічування, що відповідає ідеальній кривій намагнічування  $B(H)$ , дозволяє різко підвищити чутливість магнітних приладів та зменшити вплив механічних напружень та інших факторів на магнітні характеристики осердь [3].

### 3. Вибір функції для апроксимації середньої кривої намагнічування

При визначенні корисної е. р. с. та коефіцієнта перетворення ферозонда в умовах параметричного підходу необхідно мати залежності  $\mu_e^*(H_1)$ ,  $\mu^*(H_1)$  та  $H_1 d\mu^* / dH_1$ , задля чого потрібно вибрати функцію, яка б найбільш точно описувала ідеальну криву намагнічування осердя.

На рис. 2 зображені апроксимації ідеальної кривої намагнічування (крива 1 на рис. 1) деякими непарними функціями – експоненціальною (крива 2), гіперболічною (крива 4), гіперболічним синусом (крива 3) та гіперболічним тангенсом (крива 1) [2]. Ці функції нецридатні для точних розрахунків, перш за все, тому, що всі вони погано відтворюють процес намагнічення матеріалу полем, що влірається, до індукції насичення та мають великі відхилення від ідеальної кривої при наявності насичення (за винятком гіперболічної функції – крива 4).

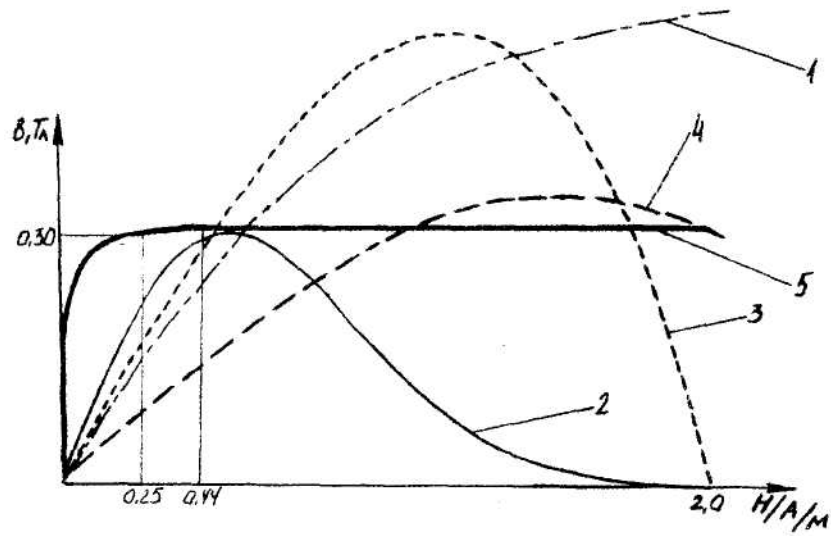


Рис. 2. Деякі функції апроксимації ідеальної кривої намагнічування

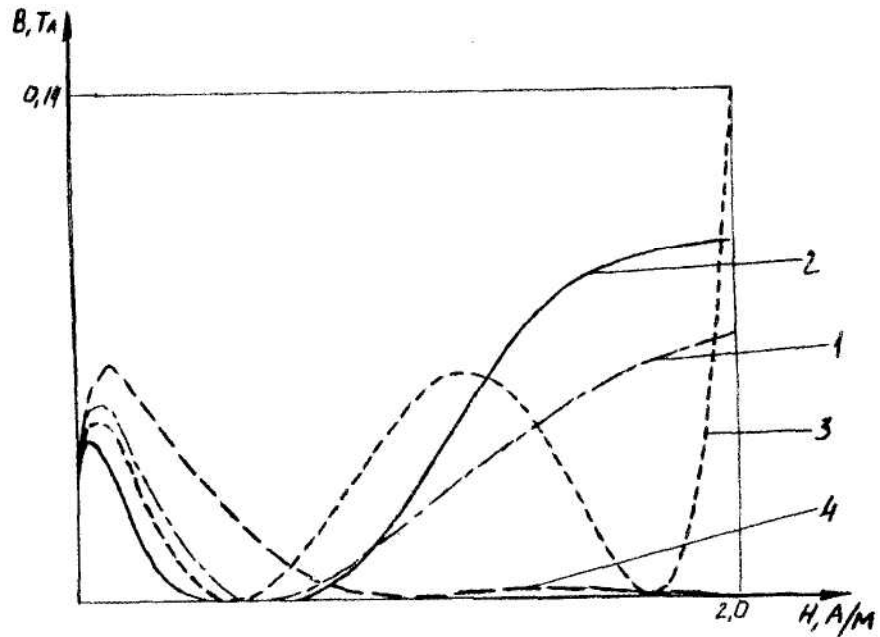


Рис. 3. Квадрати відхилень деяких апроксимуючих функцій від ідеальної кривої намагнічування

На рис. 3. відтворені графіки, які відповідають квадратам відхилень апроксимуючих функцій (рис. 2) від ідеальної кривої намагнічування (крива 5 на рис. 2, або крива 1 на рис. 1) на проміжку напруженості від 0 до 2 А·м.

Значно кращі результати дає користування функцією

$$B = \alpha \cdot \text{arctg } \beta_1 H_1, \tag{3.1}$$

де

$$\alpha = \frac{2}{\pi} B_s,$$

$$\beta_1 = \frac{10^2}{2H_s}.$$

(див. рис. 4 – крива 1).

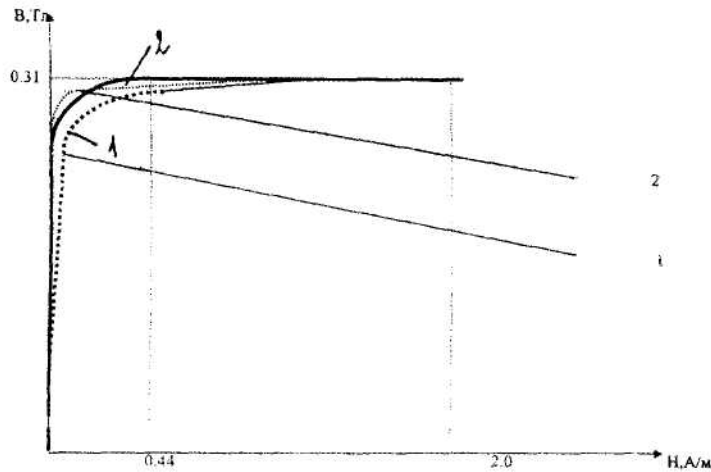


Рис. 4. Апроксимація ідеальної кривої намагнічування сплаву 79НМ функціями арктангенса

Можна також апроксимувати ідеальну криву функцією арктангенса:

$$B = \alpha \cdot \arctg \beta H,$$

з коефіцієнтами

$$\alpha = \frac{2}{\pi} B_s,$$

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2H_s}.$$

Нами для апроксимації ідеальної кривої пропонується функція:

$$B = \alpha \cdot \arctg \beta_1 H \tag{3.2}$$

з коефіцієнтом

$$\beta_1 = \frac{30\pi}{2H_s}.$$

підібраним для сплаву 79НМ за допомогою ЕОМ (крива 2 на рис. 4). Функція (3.1) дозволяє збільшити точність аналітичного відтворення ідеальної кривої намагнічування сплаву 79НМ на проміжку поля, що вимірюється:

$$0 \leq H \leq 2. \tag{3.3}$$

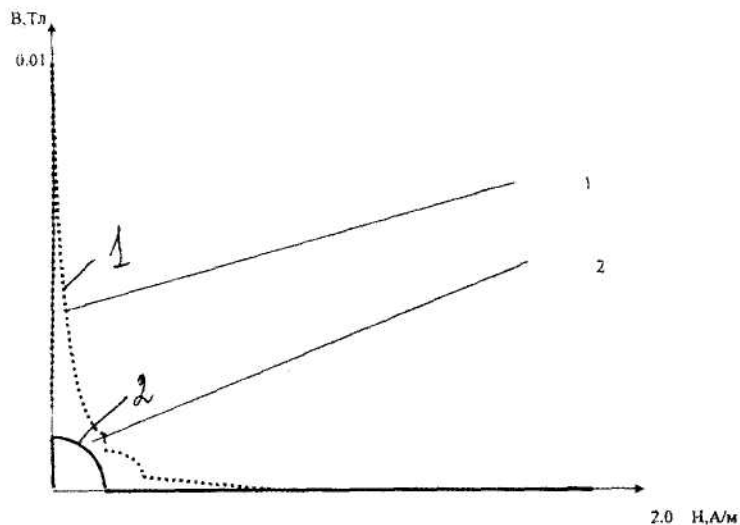


Рис. 5. Квадрати відхилень апроксимуючих функцій арктангенса від ідеальної кривої намагнічування сплаву 79НМ

На рис. 5 зображені квадрати відхилень апроксимацій по 36 значеннях H ідеальної кривої

намагнічування сплаву 79НМ функціями (3.1) та (3.2) – відповідно криві 1 і 2. Суми цих відхилень на проміжку (3.4) мають відповідно значення 0,015 та 0,0020 Тл, що доводить переваги використання запропонованої апроксимації.

#### 4. Висновки

При обчисленні корисної е.р.с. ферозонда для аналітичного відтворення (апроксимації) ідеальної кривої намагнічування сплаву 82НМ(П) найбільш придатною є функція:

$$B = \alpha \cdot \operatorname{arctg} \beta_1 H,$$

з коефіцієнтами

$$\alpha = \frac{2}{\pi} B_s,$$

$$\beta_1 = \frac{30\pi}{2H_s}.$$

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Шостачук Д.М. Ферозондові магнітовимірювальні прилади для орієнтації штучних супутників Землі. – Вісник ЖІТІ, 1998. – № 7. Технічні науки. – С. 134–139.
2. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
3. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – Наука, 1966. – 720 с.
4. Почтарев В.И. Земля – большой магнит. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 160 с.

ШОСТАЧУК Дмитро Миколайович – аспірант Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- магнітом'які феромагнітні матеріали;
- вимірювання магнітного поля космічного простору;
- магнітометричні системи;
- орієнтація штучних супутників.