

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.14

### НЕЛІНІЙНИЙ СИНТЕЗ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЗБУДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЕФЕКТОСКОПІВ

© Гальченко В. Я., Павлов О. К., Воробйов М. О., 2002  
Луганський державний медичний університет

*Запропоновано метод синтезу вихрострумів перетворювачів дефектоскопів з наперед визначеною структурою магнітного поля збудження у зоні контролю. Для вирішення рівнянь синтезу використано методи нелінійного програмування з пошуком екстремуму для випадку багатомірної “яружної” функції мети.*

Синтез вихрострумів перетворювачів дефектоскопів (ВСПД) з наперед визначеною структурою поля збудження має своєю метою реалізацію в конструкціях ВСПД нових технічних рішень щодо покращення їх експлуатаційних характеристик або повторення досягнутих при значних спрощеннях конструкції. Досить велика увага щодо використання такої методики проектування ВСПД приділяється у багатьох працях дослідників, зокрема [1-5], де цілеспрямована зміна властивостей магнітного поля збудження у відповідності до наперед визначених функцій розподілу дозволяє покращити селективність та чутливість перетворювачів, покращити їх завадозахищеність в наслідок звужування зони взаємодії згенерованого магнітного поля з об'єктом, а також обмеження магнітних потоків розсіяння перетворювача.

Загальним в цих дослідженнях є розгляд питання щодо лінійного синтезу ВСПД, коли в результаті вирішення задачі знаходиться розподіл щільності струму генераторної котушки, що забезпечує бажану структуру поля в зоні контролю.

Розглядається магнітна система соленоїдального типу, що складається з відповідної кількості секцій. Щільність струму є постійною в кожній секції, але може бути і різною. Задача синтезу полягає у визначенні розподілу струму у секціях [6].

У роботі [7] авторами запропоновано більш цікава задача щодо розміщення обмоток секцій у просторі та їх геометричних розмірів за умови фіксованої щільності струму в них. Вирішення таких задач значно складніше, тому що шукані величини нелінійно входять до відповідних функціоналів. Доречно відмітити можливість включення до складу параметрів варіювання у цьому випадку магнітотривної сили (м.р.с.)  $Iw$  кожної секції, що дозволяє у рамках єдиної моделі вирішувати різні задачі.

Розглянемо систему  $N$  коаксіальних кругових

катушок довільного перерізу при послідовному та зустрічно послідовному електричному з'єднанні секцій котушки. Вважаємо відомим розподіл напруженості магнітного поля в деякій площині  $z=Z_0$ , що паралельна робочій поверхні накладного ВСПД ( $z=0$ ). Це означає, що в площині  $z=Z_0$  необхідно сформувати магнітне поле з відомим розподілом складової  $H_z(r, Z_0)$  напруженості.

Розглянемо декілька варіантів можливого розв'язку задачі нелінійного синтезу:

1) відповідно до відомої функції  $H_z(r, Z_0)$  знайти радіуси  $R_1, R_2, \dots, R_N$  секцій генераторної котушки, що забезпечують цей розподіл при умові фіксованих координат секцій  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$  та їх м.р.с.  $(Iw)_1, (Iw)_2, \dots, (Iw)_N$  (рис. 1а);

2) знайти координати секцій  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$  при умові фіксованих радіусів  $R_1, R_2, \dots, R_N$  та м.р.с.  $(Iw)_1, (Iw)_2, \dots, (Iw)_N$  (рис. 1б);

3) знайти геометрію секцій  $R_1, R_2, \dots, R_N$  та їх розподіл у просторі  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ , допускаючи у загальному випадку можливість варіювання також значеннями м.р.с.  $(Iw)_1, (Iw)_2, \dots, (Iw)_N$  (рис. 1в);

4) задача у попередньому формулюванні, але при умові, що деякі секції згруповані та повинні знаходитись у одній площині (рис. 1г).

Магнітне поле, що згенеровано ВСПД, описується рівнянням

$$H_z = \sum_{i=1}^N K_i(z, r) \cdot (Iw)_i,$$

де  $K_i(z, r)$  – функція впливу  $i$ -ої секції генераторної котушки на точку спостереження, що розміщена на відріжку  $[c, d]$  зони контролю.

Функція  $K_i(z, r)$  залежить від геометричної форми перерізу секцій котушки, їх розмірів та розміщення відносно точки спостереження. Так, наприклад, для магнітного напівпростору є вірним наступний вираз для компоненти  $H_z$  [8]:

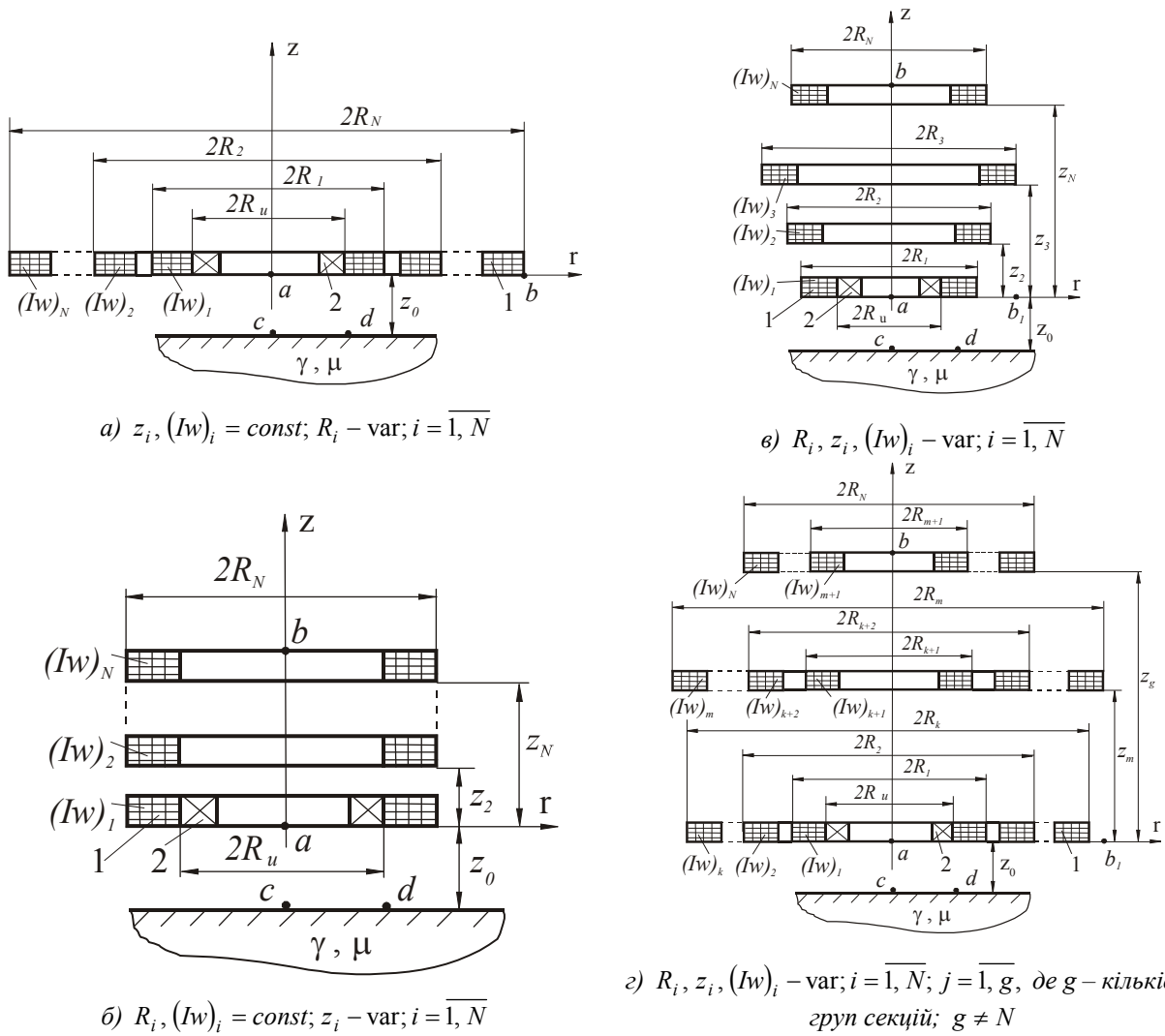


Рис. 1. Схема розміщення секцій струмових обмоток генераторної котушки ВСПД

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} H_Z &= H_{Z1} + \operatorname{Re} H_{Z2}; \\ \operatorname{Im} H_Z &= \operatorname{Im} H_{Z2}; \\ H_{Z1} &= \frac{(Iw)_i}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(R_i + r)^2 + (Z_0 - z_i)^2}} \times \\ &\times \left[ K(k) + E(k) \frac{R_i^2 - r^2 - (Z_0 - z_i)^2}{(R_i - r)^2 + (Z_0 - z_i)^2} \right]; \\ k^2 &= \frac{4\delta}{(1 + \delta)^2 + d_C^2}; \quad \delta = \frac{r}{R_i}; \quad d_C = \frac{|Z_0 - z_i|}{R_i}; \\ \operatorname{Re} H_{Z2} &= \frac{I\beta^2}{2R_i} \int_0^\infty I_1(\beta y) I_0(\beta \delta y) e^{-\alpha_1 \beta y} \Pi_1 y dy; \\ \beta &= R_i \sqrt{\omega \mu \mu_0 \sigma}; \quad \alpha_1 = \frac{(z_i + Z_0)}{R_i}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\mu^2 y^2 - \sqrt{y^4 + 1}}{\mu^2 y^2 + \sqrt{2\mu y} \sqrt{\sqrt{y^4 + 1} + y^2} + \sqrt{y^4 + 1}}; \\ \operatorname{Im} H_{Z2} &= \frac{I\beta^2}{2R_i} \int_0^\infty I_1(\beta y) I_0(\beta \delta y) e^{-\alpha_1 \beta y} \Pi_2 y dy; \\ \Pi_2 &= \frac{\sqrt{2\mu y} \sqrt{\sqrt{y^4 + 1} - y^2}}{\mu^2 y^2 + \sqrt{2\mu y} \sqrt{\sqrt{y^4 + 1} + y^2} + \sqrt{y^4 + 1}}, \end{aligned}$$

де  $H_{Z1}$  – нормальна складова напруженості магнітного поля обкрута зі струмом у вільному просторі;  $H_{Z2}$  – поле реакції вихрових струмів;  $z, r$  – координати точки спостереження;  $\mu, \varepsilon$  – електрофізичні характеристики середовища, що підлягає контролю;  $K(k), E(k)$  – повні еліптичні інтеграли відповідно 1-го та 2-го роду.

Напруженість результуючого магнітного поля в

площині  $Z_0$  визначимо за допомогою інтеграла

$$H_Z(r, Z_0) = \int_{\Omega} K(r, S, y(S)) dS, \quad r \in \Omega,$$

де  $S$  – змінна, яка приймає значення  $R, z, Iw$  або їх можливі комбінації в залежності від постановки задачі.

Таке рівняння класифікується як нелінійне інтегральне рівняння I-го роду з оператором Урисона, що слід віднести до класу некоректних задач, які потребують спеціальних методів розв'язку. Рішення цієї задачі будемо шукати шляхом мінімізації середньостепеневої апроксимації мінімаксного функціонала, що забезпечує мінімальне відхилення шуканого розподілу магнітного поля від наперед заданого

$$f(s) = \sum_{i=1}^M \left| \int_{\Omega} K(r, S, y(S)) dS - H_Z(r, Z_0) \right|^{\gamma} \rightarrow \min_{S \in \Omega}$$

де  $y(S)$  – рішення задачі;  $\gamma = 3, 4, \dots; \gamma \leq 10 \dots 15$ ;  $M$  – кількість контрольованих точок.

Функціонал  $f(S)$  є гладким і не приводить до суттєвих відхилень точності апроксимації в окремих точках. Характерною властивістю функціонала  $f(S)$  є його багатовимірний “яружний” характер, що приводить до значних труднощів пошуку оптимуму за допомогою стандартних методів із-за “заклинювання” чисельних процедур. Більшість відомих методів дозволяє достатньо швидко досягнути “дна яру”, але далі процес практично зупиняється в області досить далекій від оптимуму.

Далі для оптимізації функціоналу використовується “яружний” метод пошуку, що застосовує аналіз власних чисел  $\lambda_i(f^n)$  та власних векторів  $u_i, i=1, \dots, N$  матриці Гесе  $f^n$ :

$$f^n = \sum_{j=1}^N \lambda_j u_j u_j^T,$$

де  $u$  – ортонормальна матриця.

Алгоритм побудовано на залежності

$$y_{k+1} = y_k - h_k p_k,$$

де  $h_k$  – крок у напрямку  $p_k$ , що є найбільшим сприятливим для пошуку мінімуму;  $k$  – номер кроку.

Процес оптимізації функціоналу реалізовано у напрямку  $p_k$ , обумовленому осями, що збігаються із стовпчиками матриці  $u$  [9]. Перехід до нових осей координат доцільно здійснювати після того, як поточні осі “вичерпали себе”.

У більшості випадків при проектуванні ВСПД зустрічається необхідність накладання на шукані параметри деяких обмежень, що дозволяють знайти рішення, які можуть бути є фізично реалізованими. Ці обмеження накладаються на радіуси секцій, координати секцій у просторі та м.р.с. у вигляді сис-

тем нерівностей

$$\bar{a}_i \leq R_i \leq \bar{b}_i; \quad z_i \geq \bar{c}; \quad (Iw)_i \leq \bar{d},$$

де  $[\bar{a}_i, \bar{b}_i]$  – заданий інтервал зміни параметра  $R_i$ ;  $\bar{c}, \bar{d}$  – задані чисельні параметри.

Перетворення задачі безумовної оптимізації до задачі з обмеженнями здійснюється у результаті заміни змінних у складі функціонала

$$z_i = \bar{c} + \xi_i^2; \quad (Iw)_i = 0,5\bar{d} + 0,5\bar{d} \sin \theta_i;$$

$$R_i = \bar{b}_i + (\bar{a}_i - \bar{b}_i) \sin^2 \delta_i.$$

Далі пошук мінімуму  $f(S)$  відбувається у просторі змінних  $\xi_i, \delta_i, \theta_i$ , на які вже не накладатимуться обмеження.

Вищевказаний алгоритм доведено до комп'ютерних програм проектування ВСПД з попередньо визначеною конфігурацією поля збудження.

Проведені чисельні експерименти свідчать про достатньо високу ефективність запропонованого алгоритмічного та розробленого програмного забезпечення, а також про значні можливості вибраного підходу щодо покращення технічних характеристик засобів вихрострумової дефектоскопії.

1. Федосенко Ю. К. Теория вихретокового контроля преобразователями с неравномерной плотностью намотки обмоток // Дефектоскопия. - 1980. - № 3. - С. 82-92. 2. Сандовский В. А. Формирование электромагнитного поля в контролируемом образце // Дефектоскопия. - 1984. - № 2. - С. 46-49. 3. Стеблев Ю. И. Синтез заданных характеристик вихретоковых преобразователей // Дефектоскопия. - 1984. - № 11. - С. 12-20. 4. Стеблев Ю. И. Синтез вихретоковых преобразователей с заданной структурой возбуждающего поля в зоне контроля // Дефектоскопия. - 1986. - № 4. - С. 58-64. 5. Стеблев Ю. И. Синтез возбуждающих полей вихретоковых преобразователей для контроля локально-неоднородных изделий и сред // Дефектоскопия. - 1988. - № 5. - С. 47-56. 6. Яковенко В. В., Гальченко В. Я., Донская Л. В. Синтез катушки в магнитной системе датчика линейных перемещений // Изв. вузов. Электромеханика. - 1990. - № 6. - С. 75-78. 7. Яковенко В. В., Гальченко В. Я., Бондаренко В. Е. Синтез магнитных систем с дискретными источниками поля // Изв. вузов. Электромеханика. - 1991. - № 8. - С. 16. 8. Дякин В. В., Сандовский В. А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. - М.: Наука, 1981. - 136 с. 9. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. - М.: Мир, 1985. - 509 с.