

Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів при вихрострумових вимірюваннях із наявністю апріорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі

В.Я. Гальченко, В.В. Тичков, А.В. Сторчак, Р.В. Трембовецька

Черкаський державний технологічний університет, бульв. Шевченка, 460, 18006, Черкаси, Україна
v.tychkov@chdtu.edu.ua

Анотація

Показано перспективність розв'язку багатопараметрової оберненої задачі вихрострумових вимірювань щодо ідентифікації радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів контролю апроксимаційним методом, який передбачає використання апріорної інформації про випробування об'єктів шляхом математичного моделювання. Виконано постановку задачі, визначено основні етапи її ефективного розв'язку. Наведено універсальну математичну модель процесу вимірювань, створено комплекс програм її реалізації в середовищі Python 3. Розрахунками на тестових моделях для простих випадків, коли є відомими аналітичні розв'язки, доведено адекватність створеного програмного забезпечення. З використанням комплексу програм проведено серію чисельних експериментів, які показали можливість розрізнення різновидів профілів розподілу матеріальних характеристик об'єктів моделювання. Проведено підготовчий етап побудови апроксимаційної сурогатної моделі для випадку залежності вихідного сигналу вихрострумового перетворювача від електричної провідності та магнітної проникності при фіксованій частоті збудження, що полягає в створенні комп'ютерного плану експерименту на основі ЛП_τ-послідовностей Соболя та формуванні на базі "точної" електродинамічної моделі задачі навчальної вибірки. Вказано шляхи узагальнення на більш складні випадки розв'язку вимірювальних задач.

Ключові слова: електрична провідність; магнітна проникність; приповерхневий профіль; вихрострумові вимірювання; відновлення; обернена електродинамічна задача; сурогатна модель.

Отримано: 17.02.2020

Відредаговано: 10.03.2020

Схвалено до друку: 12.03.2020

Вступ

Електрична провідність (ЕП) і магнітна проникність (МП) металевих виробів є структурно-чутливими електрофізичними характеристиками, вимірювання розподілу яких в їх об'ємі в процесі вихрострумового неруйнівного контролю дозволяє завдяки кореляційним зв'язкам отримати практично повну інформацію щодо фізико-механічних властивостей (в'язкості, пластичності, твердості, теплоємності, міцності тощо), напружено-деформованого стану об'єкта контролю (ОК), глибини та якості термічної й хімічної обробки його поверхні. Крім того, хімічний і фазовий склад; степінь концентрації водню в поверхневих шарах ОК із легких сплавів на основі титану, цирконію; виявлення ділянок ОК, які знаходилися під впливом високих температур, оцінка їх розмірів та рівня температурних впливів – це далеко не повний перелік параметрів, контроль яких є можливим із використанням таких вимірювальних процедур [1–3]. Таким чином, визначення просторових розподілів

ЕП та МП в об'ємі об'єкта контролю ОК на основі вимірювань вихрострумовими перетворювачами (ВСП) є актуальною науково-технічною задачею, що має суттєве практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі є відомими чимала кількість варіантів реалізації підходів до розв'язку цієї задачі. Зосередимося надалі на критичному аналізі відомих із науково-технічної літератури методів із зазначенням їхніх переваг та недоліків. Стаття [4] містить розв'язання оберненої задачі багатопараметрового контролю феромагнітних матеріалів змінно-частотним методом вихрових струмів. Запропоновано оптимізаційний підхід отримання електрофізичних характеристик об'єктів методом Флетчера–Пауела, який мінімізацією функції цілі дає змогу оцінити різницю між виміряними й обчисленими значеннями частоти збудження.

Але метод не дозволяє окремо контролювати питомі ЕП та МП, а лише обмежується визна-

ченням електромагнітного параметра металевого виробу $\eta = \sigma \cdot \mu$.

У дослідженнях [5–7] розглянуто електромагнітний перетворювач із просторово-періодичною структурою поля. Показано, що такий давач дозволяє безконтактно вимірювати ЕП, МП і геометричні параметри металевих виробів у формі протяжного феромагнітного циліндра за рахунок розміщення вимірювальних обмоток таким чином, щоб можна було отримати інформацію про параметри декількох гармонік поля. Проблемною у використанні такого перетворювача є наявність декількох обмоток, які мають бути розміщені в різних місцях ОК, де електрофізичні характеристики можуть різнитися локально, що призводить до додаткових похибок вимірювання. Крім того, можливими є похибки просторового позиціонування вимірювальних обмоток.

В публікації [8] розв'язок оберненої задачі електродинаміки щодо реконструкції структури ОК за вимірними сигналами ВСП рекомендується шукати засобами лінійного програмування. Лінійні припущення, які використано при побудові математичної моделі, а, відповідно, й запропонований метод суперпозиції не є строгими і значно спрощують реальні фізичні процеси. Крім того, при проведенні вимірювальних операцій використовуються декілька частот, що ускладнює проведення процедури.

В дослідженнях [9–11] запропоновано досить цікавий, на погляд авторів, підхід розв'язку оберненої задачі, що ґрунтується на побудові наближеної багатовимірної нелінійної прямої та (або) зворотної функції перетворення вимірювальної системи. Зазначені два класи функцій перетворення будуються на базі відповідних масивів значень параметрів ОК та значень інформаційних параметрів ВСП. Масив інформаційних параметрів отримується на різних частотах збудження або при зміні геометричних розмірів обмоток перетворювача. Модель зворотної функції перетворення представлено багатовимірним поліномом у базисі інформаційних параметрів.

Відповідно при використанні прямої функції перетворення відшукується розв'язок системи нелінійних рівнянь відносно невідомих параметрів. У випадку використання зворотної функції для визначення параметрів ОК застосовується знайдена нелінійна поліноміальна залежність від компонент вектора інформаційних параметрів перетворювача. До недоліків методу слід віднести певні труднощі щодо вибору структури полінома, що апріорі є невідомою, яка би забезпечила прийнятну похибку апроксимації гіперповерхні відгуку. Також відзначимо, що з ростом числа невідомих параметрів ОК, а відповідно розмірності гіперпростору, провести поліноміальну апроксимацію стає практично неможливим.

В статтях [12–17] міститься інформація щодо методів пошуку розв'язку цієї задачі, що також ґрунтуються на об'єднанні експериментальних досліджень шляхом вимірювань та математичного моделювання електромагнітних полів. Переважна увага в цих публікаціях приділяється оптимізаційному методу розв'язання оберненої задачі, коли багаторазово використовується модель прямої задачі для оцінки невідомих параметрів ОК, що трактується як попередні прогнози вимірювань. Надалі варіюванням розподілу електрофізичних параметрів ОК різниця між прогнозами та результатами вимірювань мінімізується в сенсі середньоквадратичного відхилення.

Тому зусилля дослідників значною мірою сконцентровано на отриманні маловитратних та дещо спрощених адекватних моделей прямих задач [16, 17]. Але проблема знаходження варіантів прийняттого компромісу між точністю моделей та їх ресурсоемністю ще залишається не вирішеною повною мірою та потребує додаткових досліджень. Поява останнім часом нових популяційних метаевристичних біонічних оптимізаційних технік глобального пошуку екстремумів також дозволяє значно покращити показники обчислювальних процедур із використанням навіть більш строгих, ніж середньоквадратичних фітнес-функцій, що є певним резервом у вдосконаленні відповідних алгоритмів.

Таким чином, критичний аналіз джерел науково-технічної інформації досліджуваної тематики дозволяє зробити висновок щодо сучасного рівня розвитку методів вирішення сформульованої проблемної ситуації. Останнім часом плідною є ідея, що полягає в системному поєднанні при побудові систем контролю як вимірювальних ресурсів, так і обчислювальних, які виконують функції моделювання безпосередньо в робочому вимірювальному контурі.

Такий підхід прийнято називати апроксимаційним [18]. Він інтегрує методи та засоби створення апріорної математичної моделі, яку побудовано на попередньо отриманих даних щодо ОК, та фактичних результатів вимірювання, що зафіксовано експериментально, тобто передбачає проведення натурно-модельних випробувань ОК. Задачу ідентифікації профілів електрофізичних характеристик ОК на основі доступних для фіксації параметрів результатів вихрострумів вимірювань у запропонованому сенсі слід вважати апроксимаційною, а з обчислювальної точки зору можна віднести до обернених задач.

Для визначеності надалі обмежимося дослідженням циліндричних ОК та прохідних ВСП. Тоді задача полягає у визначенні профілю вказаних матеріальних характеристик ОК вздовж його радіуса.

Постановка проблеми

Розв'язування оберненої задачі оптимізаційним методом як найбільш поширеним, доволі потужним та універсальним передбачає циклічний багаторазовий розв'язок прямої задачі, що саме імітує проведення натурних досліджень.

Ідея методу полягає в умовній у загальному випадку мінімізації непогодженості між результатами вимірювання та синтезованими за апріорною моделлю даними.

Стримуючими факторами щодо застосування оптимізаційних методів розв'язку оберненої задачі, на думку багатьох дослідників [19, 20], є: необхідність знаходження глобального мінімуму багатоекстремального функціоналу якості, висока часова ресурсоемність навіть одноразового розв'язання прямої задачі, проблеми виконання процедури регуляризації для отримання псевдорозв'язку некоректно поставленої задачі, багатопараметровість задачі і, як наслідок, відповідність моделі та ОК, необхідність скорочення часу розв'язку оберненої задачі.

Тому є сенс виконувати пошук розв'язку сформульованої оберненої задачі в декілька рознесених у часі етапів, використовуючи певні техніки щодо подолання вказаних перешкод, а саме:

- “точний” розв'язок прямої електродинамічної задачі взаємодії квазістаціонарного електромагнітного поля, яке згенеровано прохідним ВСП, з феромагнітним циліндричним ОК, що характеризується безперервними вздовж радіусу профілями електрофізичних характеристик;

- планування обчислювального експерименту та побудова засобами багатовимірної апроксимації, яка ґрунтується на техніці сурогатного моделювання, апріорної моделі-замісника (метамоделі) [21, 22], що є значно менш ресурсоемною та наближено з прийнятною точністю відтворює “точну”;

- розв'язок оберненої задачі оптимізаційним гібридним популяційним метаевристичним методом [23, 24] на базі проведених вимірювань із використанням ВСП та сурогатної моделі, створеної на попередньому етапі.

Такий підхід дозволяє створити компактний у сенсі мінімізації витрат часу, максимізації надійності та точності обчислень алгоритм розв'язку вимірювальної оберненої задачі.

Метою дослідження є розробка алгоритмів та комплексу програм для формування масиву даних, які призначені для створення апріорної апроксимаційної моделі-замісника на основі “точної” електродинамічної моделі процесу контролю циліндричного ОК прохідним ВСП, що становить початковий етап розв'язку вимірювальної оберненої задачі.

Виклад основного матеріалу

“Точна” електродинамічна математична модель процесу вимірювань

Математична модель описує процес контролю прохідним круговим ВСП циліндричного співвісного ОК. Припускається, що матеріал ОК має неперервну зміну електрофізичних параметрів уздовж його радіусу $\sigma = \sigma(r)$, $\mu = \mu(r)$. Відомими є деякі аналітичні моделі таких ОК [25, 26], але внаслідок універсальності надалі має сенс використовувати модель Uzal-Dodd-Deeds [27, 28]. Для спрощення представлення профілю розподілу параметрів у її контексті пропонується використовувати кусково-постійну апроксимацію, коли ОК вважається умовно багат шаровим та електрофізичні параметри в кожному n -му шарі із його $(K-1)$ шарів приймаються сталими: $\sigma_n = \sigma(r)$, $\mu_n = \mu(r)$, де $n = 1, 2, \dots, (K-1)$.

Для коректного опису математичної моделі введено поняття регіону. Кожен регіон у циліндричній системі координат може бути описаний системою таких нерівностей:

$$R_1 = \{0 \leq r \leq r_1, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -\infty < z < \infty\}$$

⋮

$$R_i = \{r_{i-1} \leq r \leq r_i, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -\infty < z < \infty\}$$

⋮

$$R_N = \{r_{N-1} < r, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -\infty < z < \infty\},$$

де $i = 2, 3, \dots, (N-1)$, а N – загальна кількість регіонів, $r_{N-1} = r_d$.

Математична модель складалася при прийнятті таких припущень [27]: середовища є лінійними, ізотропними та однорідними; струм збудження I є синусоїдальним, що змінюється з кутовою частотою ω . Котушка збудження на початковому етапі розглядалася як нескінченно тонкий виток з радіусом r_d . Також приймається, що осі ВСП та циліндричного ОК співпадають.

Густина струму збудження та векторний потенціал у циліндричній системі координат за таких умов мають тільки азимутальну складову:

$$\vec{A}(r, \varphi, z) = A(r, z)\vec{e}_\varphi,$$

$$\vec{J}(r, \varphi, z) = J(r, z)\vec{e}_\varphi.$$

Диференціальні рівняння для векторного потенціалу в регіонах із номерами $(N-1)$ та N можна записати у вигляді:

$$R_{N-1} \cup R_N : \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} - \frac{A}{r^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = 0,$$

а в регіонах R_1, R_2, \dots, R_{N-2} відповідно:

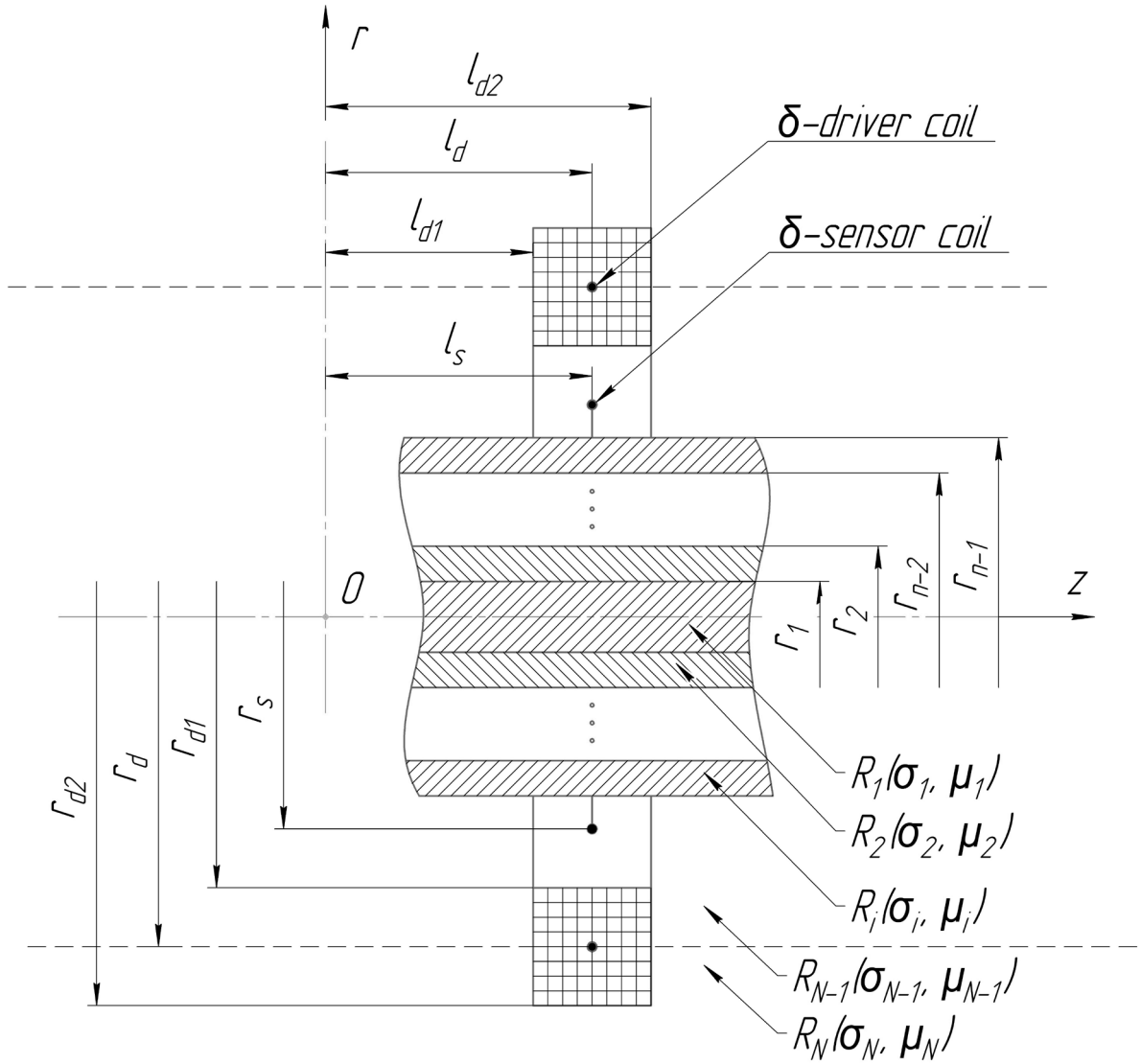


Рис. 1. Геометрична модель ВСП: r_{d1} , r_{d2} – внутрішній та зовнішній радіуси котушки збудження відповідно; r_n – зовнішній радіус n -го шару; l_{d1} , l_{d2} – відстані до граней котушки збудження, r_s – радіус вимірювального витка, l_s – відстань до вимірювального витка

$$\frac{\partial^2 A^{(i)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A^{(i)}}{\partial r} - \frac{A^{(i)}}{r^2} + \frac{\partial^2 A^{(i)}}{\partial z^2} = j\omega\mu_i\sigma_i A^{(i)},$$

де $i = 1, 2, \dots, (N-2)$,
 μ_i – абсолютна магнітна проникність, $j = \sqrt{-1}$.

$$A^{(i)}(r, z)|_{r=r_i} = A^{(i+1)}(r, z)|_{r=r_i},$$

$$\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A^{(i)}}{\partial r}(r, z)|_{r=r_i} = \frac{1}{\mu_{i+1}} \frac{\partial A^{(i+1)}}{\partial r}(r, z)|_{r=r_i},$$

Враховуючи, що для векторного потенціалу з фізичних міркувань виконуються такі умови:
 а) A є скінченним при $r=0$, б) $A \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$, та беручи до уваги граничні умови:

де $i = 1, 2, \dots, (N-2)$

$$A^{(N-1)}(r, z)|_{r=r_{N-1}} = A^{(N)}(r, z)|_{r=r_{N-1}},$$

$$\frac{1}{\mu_{N-1}} \frac{\partial A^{(N-1)}}{\partial r}(r, z)|_{r=r_{N-1}} = \frac{1}{\mu_N} \frac{\partial A^{(N)}}{\partial r}(r, z)|_{r=r_{N-1}} + I\delta(r-r_d)\delta(z-z_d),$$

де δ – дельта-функція Дірака, отримано рівняння для векторного потенціалу в будь-якому

регіоні в середині витка зі струмом, що має такий вигляд:

$$A(r, z, r_d, z_d) = \frac{I\mu_0 r_d}{\pi} \int_0^\infty \frac{Q1 Q2}{U_{22}V_{11} - U_{12}V_{21}} \cos(\alpha(z - z_d)) d\alpha,$$

$$Q1 = V_{11}I_1(\alpha_n r) + V_{21}K_1(\alpha_n r),$$

$$Q2 = U_{12}I_1(\alpha r_d) + U_{22}K_1(\alpha r_d),$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала;

$$V_{11}(n+1, n) = \left(K_0(\alpha_{n+1} r_n) I_1(\alpha_n r_n) + \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} I_0(\alpha_n r_n) K_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n;$$

$$U_{12}(n+1, n) = \left(K_0(\alpha_{n+1} r_n) K_1(\alpha_n r_n) - \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} K_0(\alpha_n r_n) K_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n;$$

$$V_{21}(n+1, n) = \left(I_0(\alpha_{n+1} r_n) I_1(\alpha_n r_n) - \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} I_0(\alpha_n r_n) I_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n;$$

$$U_{22}(n+1, n) = \left(I_0(\alpha_{n+1} r_n) K_1(\alpha_n r_n) + \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} K_0(\alpha_n r_n) I_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n;$$

$$\beta_n = \left(\frac{\mu_0}{\mu_n} \right) \alpha_n;$$

I_0, I_1 – модифіковані функції Беселя першого роду нульового та першого порядків від комплексного аргументу;

K_0, K_1 – модифіковані функції Беселя другого роду нульового та першого порядків від комплексного аргументу;

$$\alpha_n = \sqrt{\alpha^2 - j\mu_n \sigma_n}, \quad n = 1, 2, \dots, K.$$

Векторний потенціал в області в середині котушки збудження, яка має прямокутний поперечний переріз та однорідний розподіл густини струму збудження, можна записати у вигляді:

$$A(r, z) = IN_d \int_{l_{d1}}^{l_{d2}} \int_{r_{d1}}^{r_{d2}} A(r, z, r_d, z_d) dr_d dz_d,$$

де $N_d = \frac{W}{(r_{d2} - r_{d1})(l_{d2} - l_{d1})}$; W – кількість витків котушки збудження.

Зміною порядку інтегрування та в результаті його виконання отримано вираз для векторного потенціалу:

$$A(r, z) = \frac{IN_d \mu_0 r_d}{\pi} \int_0^\infty \frac{Q1 Q2}{\alpha^3 (U_{22}V_{11} - U_{12}V_{21})} Q3 d\alpha,$$

$$Q1 = \sin(\alpha(z - l_{d1})) - \sin(\alpha(z - l_{d2})),$$

$$Q2 = V_{11}I_1(\alpha_n r) + V_{21}K_1(\alpha_n r), \quad (1)$$

$$Q3 = U_{12}I(r_{d2}, r_{d1}) + U_{22}K(r_{d2}, r_{d1}),$$

$$\text{де } I(r_{d2}, r_{d1}) = \int_{\alpha r_{d1}}^{\alpha r_{d2}} t I_1(\alpha t) dt;$$

$$K(r_{d2}, r_{d1}) = \int_{\alpha r_{d1}}^{\alpha r_{d2}} t K_1(\alpha t) dt.$$

Наведена в круговому вимірювальному витку напруга з врахуванням (1) обчислюється відповідно до співвідношення:

$$E = j\omega \oint_{l_{s-coil}} \vec{A} dl = j\omega 2\pi r_s A(r_s, z_s). \quad (2)$$

Для обчислення напруги було складено програмне забезпечення, яке реалізовано мовою програмування Python 3 та з використанням бібліотек NumPy і SciPy.

Верифікацію комплексу програм було проведено за допомогою аналітичних моделей для більш простих випадків, тобто двошарових ОК [29, 30], які дозволяють отримати значення векторного потенціалу в області розміщення вимірювального витка, а також за допомогою програмного продукту мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics (AC/DC Module), що використовує для аналогічних розрахунків метод скінченних елементів (МСЕ).

Спрощена тестова модель для двошарового ОК із немагнітного матеріалу [29] має вигляд:

$$A(r, z) = \frac{IN_d \mu_0}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{K(r_{d2}, r_{d1})}{\alpha^3} \left\{ I_1(\alpha r) - \left[\frac{K_1(\alpha_2 r_2)}{r_2 D(\alpha) K_1(\alpha r_2)} \times \right. \right. \right. \\ \times (\alpha_1 I_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1) - \alpha_2 I_1(\alpha_1 r_1) I_0(\alpha_2 r_1)) - \frac{I_1(\alpha_2 r_2)}{r_2 D(\alpha) K_1(\alpha r_2)} \times \\ \left. \left. \left. \times (\alpha_2 K_0(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1) - \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1)) + \frac{I_1(\alpha r_2)}{K_1(\alpha r_2)} \right] K_1(\alpha r) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times [\sin(\alpha(z - l_{d1})) - \sin(\alpha(z - l_{d2}))] \right\} \right\} d\alpha,$$

$$D(\alpha) = \left[\alpha_2 K_0(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2) - \alpha K_0(\alpha r_2) K_1(\alpha_2 r_2) \right] \times \\ \times \left[\alpha_1 I_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1) - \alpha_2 I_1(\alpha_1 r_1) I_0(\alpha_2 r_1) \right] + \\ + \left[\alpha_2 K_0(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1) + \alpha_1 K_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1) \right] \times \\ \times \left[\alpha I_1(\alpha_2 r_2) K_0(\alpha r_2) + \alpha_2 I_0(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2) \right].$$

Другу тестову модель [30] для ОК з магнітного матеріалу подано рівнянням:

$$A(r, z) = \frac{IN_d \mu_0}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{K(r_{d2}, r_{d1})}{\alpha^3} \left\{ I_1(\alpha r) + S(\alpha) K_1(\alpha r) \right\} \times \right. \\ \left. \times [\sin(\alpha(z - l_{d1})) - \sin(\alpha(z - l_{d2}))] \right\} d\alpha,$$

$$D(\alpha) = \left[\alpha K_1'(\alpha r_2) K_1(\alpha_2 r_2) - \beta_2 K_1'(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2) \right] \times \\ \times \left[\beta_1 I_1(\alpha_2 r_1) I_1'(\alpha_1 r_1) - \beta_2 I_1(\alpha_1 r_1) I_1'(\alpha_2 r_1) \right] + \\ + \left[\beta_1 K_1(\alpha_2 r_1) I_1'(\alpha_1 r_1) - \beta_2 K_1'(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1) \right] \times \\ \times \left[\beta_2 I_1'(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2) - \alpha I_1(\alpha_2 r_2) K_1'(\alpha r_2) \right],$$

$$S(\alpha) = \frac{1}{r_2 D(\alpha) K_1(\alpha r_2)} \left\{ K_1(\alpha_2 r_2) \left[\beta_2 I_1(\alpha_1 r_1) I_1'(\alpha_2 r_1) - \right. \right. \\ \left. \left. - \beta_1 I_1(\alpha_2 r_1) I_1'(\alpha_1 r_1) \right] + I_1(\alpha_2 r_2) \left[\beta_1 K_1(\alpha_2 r_1) I_1'(\alpha_1 r_1) - \right. \right. \\ \left. \left. - \beta_2 K_1'(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1) \right] - r_2 D(\alpha) I_1(\alpha r_2) \right\}.$$

Для верифікації за допомогою пакету COMSOL Multiphysics використовувалася модель, побудована в вісесиметричній системі координат. ЕП повітря регіону моделі R_3 (рис. 2) при розрахунках дорівнювала 1 См/м, оскільки це значно зменшує час розрахунку МСЕ, але суттєво не спотворює числовий результат. Геометричні розміри цього регіону (Air box) штучно обмежувалися та

становили: радіус $r_{ab} = 80$ мм; відстані до обмежувальних границь $l_{ab1} = 0$ мм, $l_{ab2} = 100$ мм відповідно.

Котушка збудження вважалася однорідною й багатовитковою (Homogenized multi-turn coil).

Вимірювальна котушка розглядалась як δ -функція Дірака. Загальний вигляд геометричної моделі показано на рис. 2.

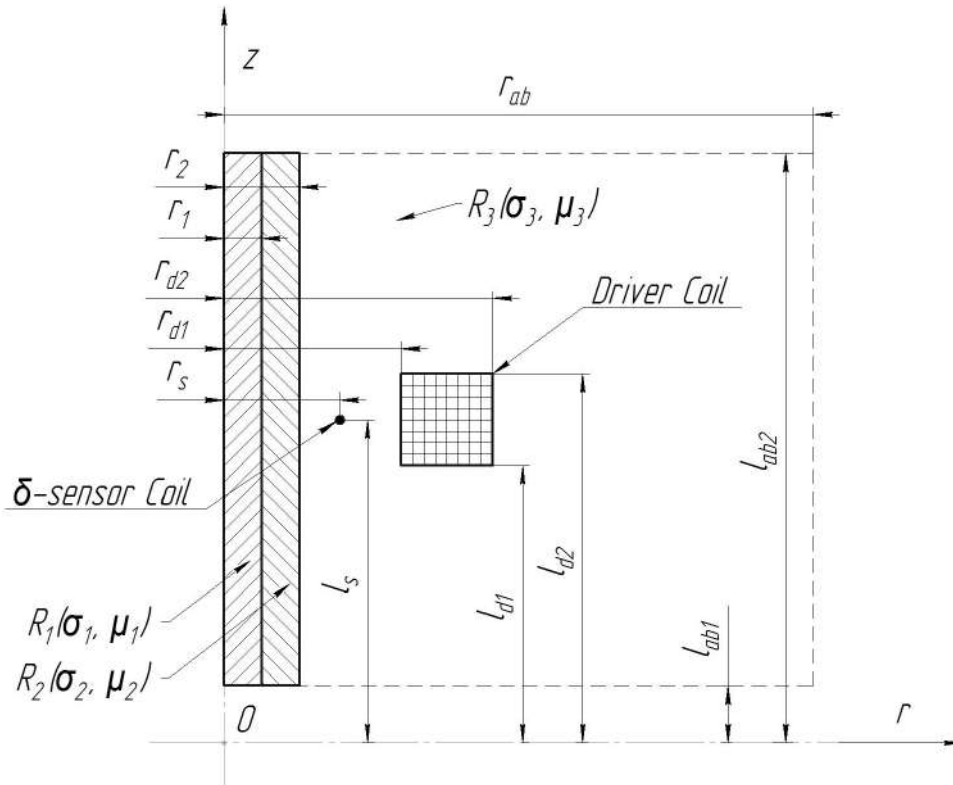


Рис. 2. Геометрична модель ВСП для моделювання в пакеті COMSOL Multiphysics

Таблиця 1

Вихідні дані для моделей немагнітного ОК

r_{d1} , мм	r_{d2} , мм	l_{d1} , мм	l_{d2} , мм	r_s , мм	l_s , мм	r_1 , мм	r_2 , мм	σ_1 , См/м	σ_2 , См/м	μ_{r1}	μ_{r2}	W,	I, А
16	19	47.5	52.5	13.5	50	9	10	3.766×10^7	1.88×10^7	1	1	100	1

Таблиця 2

Результати обчислень дійсної та уявної частин векторного потенціалу для немагнітного ОК

Частота, Гц	Векторний потенціал, Вб/м							
	модель [29]		модель [30]		модель [27, 28]		модель МСЕ	
	Re A $\times 10^{-5}$	Im A $\times 10^{-6}$	Re A $\times 10^{-5}$	Im A $\times 10^{-6}$	Re A $\times 10^{-5}$	Im A $\times 10^{-6}$	Re A $\times 10^{-5}$	Im A $\times 10^{-6}$
100	2.89007	-2.41258	2.89007	-2.41258	2.89007	-2.41258	2.86060	-2.34160
200	2.72492	-3.48933	2.72492	-3.48933	2.72492	-3.48933	2.70060	-3.40250
300	2.59301	-3.69192	2.59301	-3.69192	2.59301	-3.69192	2.57190	-3.61150
...
2400	2.16979	-2.28339	2.16979	-2.28339	2.16979	-2.28339	2.15530	-2.25060
2500	2.16370	-2.25452	2.16370	-2.25452	2.16370	-2.25452	2.14930	-2.22240
2600	2.15794	-2.22722	2.15794	-2.22722	2.15794	-2.22722	2.14360	-2.19570
...
4800	2.07383	-1.82864	2.07383	-1.82864	2.07383	-1.82864	2.06060	-1.80640
4900	2.07157	-1.81796	2.07157	-1.81796	2.07157	-1.81796	2.05830	-1.79590
5000	2.06936	-1.80756	2.06936	-1.80756	2.06936	-1.80756	2.05610	-1.78580

У табл. 1 наведено вихідні дані для розрахунків з використанням моделей немагнітного ОК, де μ_m – відносна МП n -го шару ОК. Результати обчислення векторного потенціалу для чотирьох випадків використання вищевказаних моделей наведено в табл. 2.

Результати обчислень свідчать про досить високу точність розрахунків, при яких максимальна відносна похибка для дійсної та уявної частин векторного потенціалу не перевищує 3 % (1,7 % в області частот вище 1 кГц), що дозволяє вважати модель, яка підлягає верифікації, адекватною.

Вихідні дані для верифікації моделі слабомагнітного ОК наведено в табл. 3.

Порівняльний аналіз результатів обчислення векторного потенціалу на основі моделі [27, 28] та моделі МСЕ можливий з урахуванням даних табл. 4.

Максимальна похибка обчислень з використанням моделі [27, 28] є дещо більшою, ніж для

попереднього випадку немагнітного ОК, та становить 7,6 % в області частот вище 1 кГц, але в цьому випадку точність результатів можна вважати прийнятною для магнітних розрахунків. Графік розбіжностей чисельних значень дійсної та уявної частин векторного потенціалу (табл. 4) в залежності від частоти збудження для наочності показано на рис. 3 та 4.

Таблиця 3

Вихідні дані для моделей слабомагнітного ОК

r_{d1} , мм	r_{d2} , мм	l_{d1} , мм	l_{d2} , мм	r_s , мм	l_s , мм	r_1 , мм	r_2 , мм	σ_1 , См/м	σ_2 , См/м	μ_{r1}	μ_{r2}	W,	I, А
16	19	47.5	52.5	13.5	50	9	10	6.99×10^6	3.495×10^6	25	15	100	1

Таблиця 4

Результати обчислень дійсної та уявної частин векторного потенціалу для слабомагнітного ОК

Частота, Гц	Векторний потенціал, Вб/м			
	модель [27, 28]		модель МСЕ	
	Re A $\times 10^{-5}$	Im A $\times 10^{-5}$	Re A $\times 10^{-5}$	Im A $\times 10^{-5}$
100	8.36504	-2.77174	7.89160	-1.94760
200	7.05051	-2.50664	6.83770	-2.00940
300	6.40149	-2.33445	6.26320	-1.97350
...
2400	3.92757	-1.38956	3.88870	-1.33390
2500	3.89292	-1.37199	3.85430	-1.31850
2600	3.86010	-1.35520	3.82160	-1.30370
...
4800	3.40407	-1.10740	3.36550	-1.07590
4900	3.39051	-1.09961	3.35200	-1.06850
5000	3.37732	-1.09202	3.33880	-1.06120

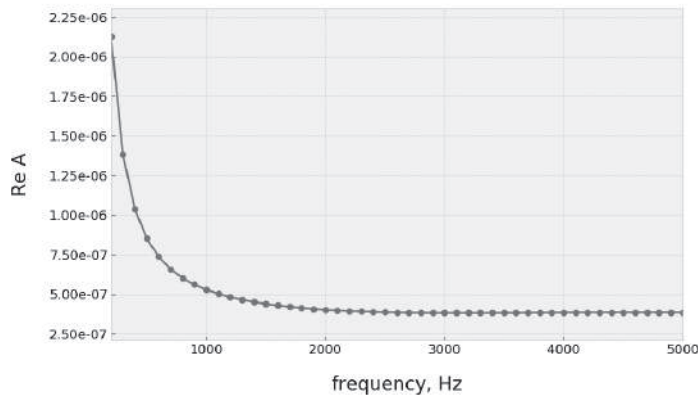


Рис. 3. Абсолютна похибка розрахунку значень дійсної складової векторного потенціалу для слабомагнітного ОК

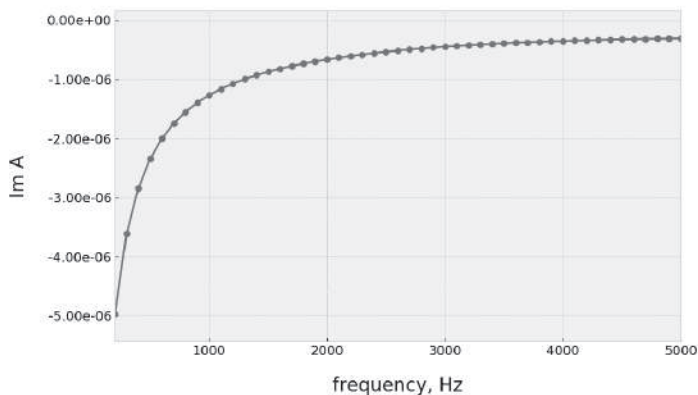


Рис. 4. Абсолютна похибка розрахунку значень уявної складової векторного потенціалу для слабомагнітного ОК

Аналіз даних, наведених на цих рисунках, свідчить щодо більшої похибки в області частот, нижчих за 1 кГц, які практично не використовуються при вихрострумових вимірюваннях.

Таким чином, запропоновану математичну модель та створений комплекс програм її реалізації можна вважати придатними для подальших чисельних експериментів.

Чисельні експерименти

При обраній математичній моделі [27, 28] ЕП та МП в умовних шарах матеріалу ОК є сталими. Поверхнева обробка виробу призводить до зміни електрофізичних параметрів матеріалу приповерхневої зони ОК, тому застосовується

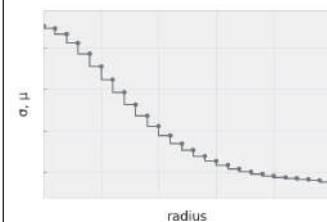
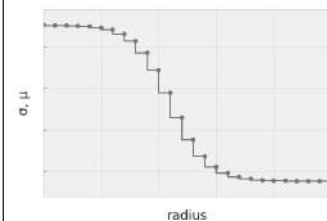
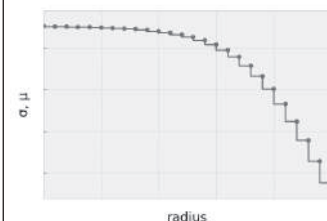
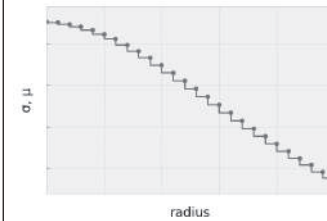
техніка її умовного дроблення. В кожному умовному шарі відбувається зміна параметрів матеріалу відповідно до апроксимаційних залежностей їх неперервної зміни.

При проведенні чисельних експериментів для дослідження можливості розрізнення профілів розподілу параметрів було обрано чотири типи функцій їх апроксимації, які подано в табл. 5 [25, 28].

На практиці профілі електрофізичних характеристик, які вважатимемо “нормою”, тобто взірцем, що отриманий внаслідок коректної технологічної поверхневої обробки ОК одним із відомих способів, можуть бути визначені експериментально.

Таблиця 5

Апроксимаційні функції профілів розподілу електрофізичних параметрів

Вид апроксимації	Апроксимаційна модель	Графічне зображення
Гаусіан	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)e^{-\frac{r^2}{g^2}}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)e^{-\frac{r^2}{g^2}}$	
Гіперболічний тангенс	$\sigma(r) = \sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \left(1 + \tanh \frac{r+c}{2a} \right)$ $\mu(r) = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{2} \left(1 + \tanh \frac{r+c}{2a} \right)$	
Експоненціальна функція	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)e^{\frac{r}{b}}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)e^{\frac{r}{b}}$	
Степенева функція	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)r^{-2}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)r^{-2}$	

У табл. 5 $\sigma_1, \mu_1; \sigma_2, \mu_2$ – початкові та кінцеві значення відповідних параметрів зони апроксимації; a, b, c, g, r – параметри, що задають вигляд апроксимаційної моделі.

На рис. 5 наведено характер зміни напруги, індукованої у вимірювальному витку навколо двошарового ОК, спричиненої варіацією зовнішнього радіуса першого шару r_1 при сталому радіусі другого шару. Для розрахунків

використовувалися дані табл. 1, а радіус r_1 першого шару дорівнював фіксованим значенням 8; 8,5; 9; 9,5 мм.

На рис. 6 зображено графіки зміни напруги, індукованої у вимірювальному витку, в залежності від зміни профілів ЕП. Приповерхневу зону було представлено 50-ма шарами. Провідність першого шару ОК була сталою, а провідності шарів з 2-го по 51-й включно задавалися

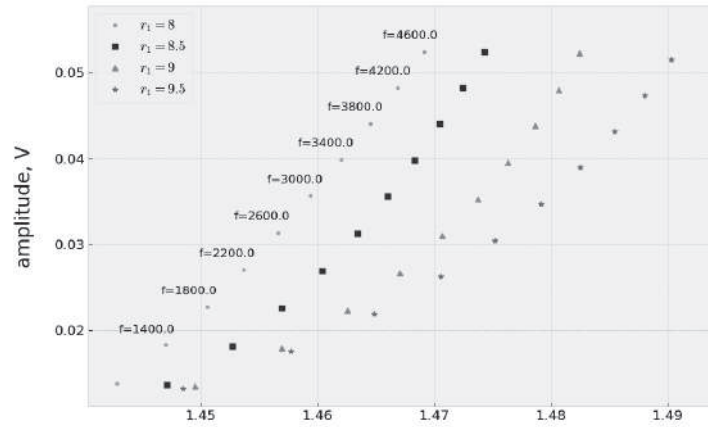


Рис. 5. Індукована напруга для двохшарового немагнітного ОК

у відповідності до однієї з функцій апроксимації профілю розподілу і змінювалися в діапазоні від 3.766×10^7 до 1.88×10^7 См/м. Зовнішні радіуси шарів з 2-го по 51-й включно змінювалися лінійно від 9 до 10 мм. Інші дані для моделювання бралися із табл. 1.

На рис. 7 зображено залежності зміни напру-

ги, індукованої у вимірювальному витку, від зміни профілів розподілу МП ОК. Відносна МП першого шару ОК була сталою, а для шарів з 2-го по 51-й включно – задавалася відповідно до однієї з функцій апроксимації профілю розподілу в діапазоні від 25 до 15. Для моделювання застосовувалися дані табл. 3.

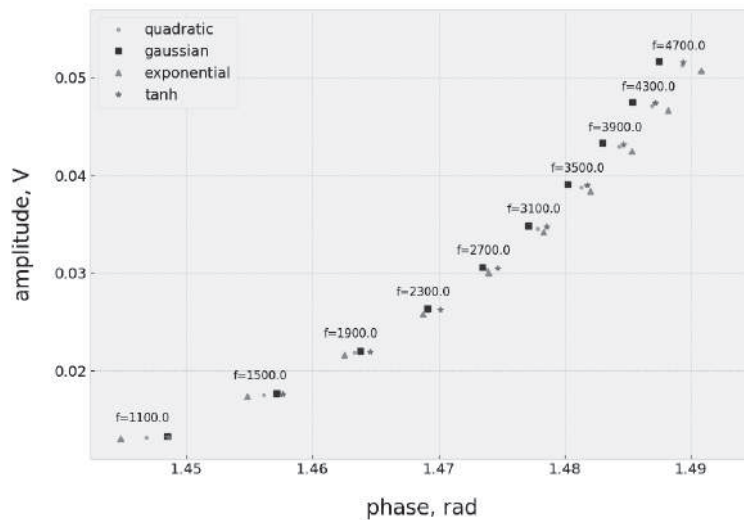


Рис. 6. Індукована напруга при різних профілях розподілу провідності для немагнітного ОК

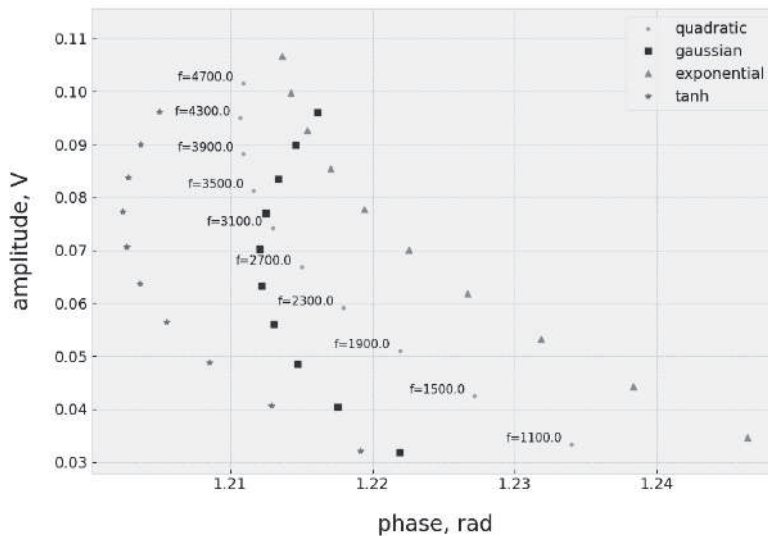


Рис. 7. Індукована напруга при різних профілях розподілу магнітної проникності для слабомагнітного ОК

На рис. 8 зображено характер зміни напру- ги, індукованої у вимірювальному витку, від зміни профілів розподілу провідності та магнітної проникності ОК одночасно. ЕП та відносна МП першого шару ОК були сталими, а для шарів

з 2-го по 51-й включно задавалися відповідно до однієї з функцій апроксимації профілів розпо- ділу. ЕП змінювалася в діапазоні від 6.99×10^6 до 3.495×10^6 См/м, а відносна МП – від 25 до 15. Для моделювання застосовувалися дані табл. 3.

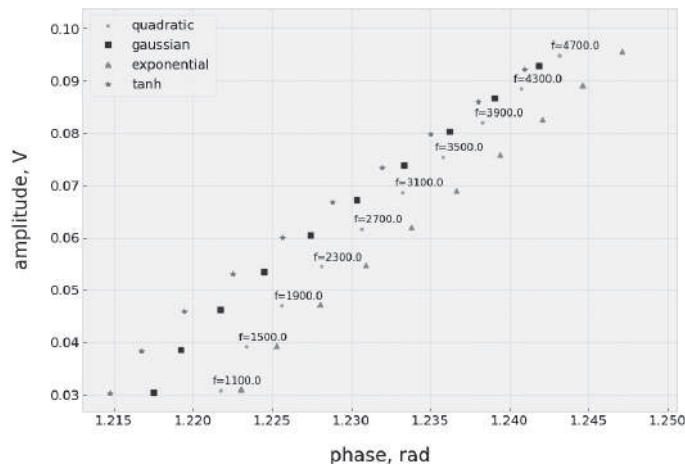


Рис. 8. Індукована напруга при різних профілях розподілу провідності та магнітної проникності для слабomagнітного ОК

Аналіз результатів чисельних експериментів показав можливість вибору частоти збудження ВСП, на якій найкраще проявляється розрізнення профілів розподілу електрофізичних параметрів матеріалу циліндричних виробів.

Формування вибірки для побудови сурогатної моделі

Формування навчальної вибірки для побудови сурогатної моделі є одним з найважливіших етапів дослідження, оскільки суттєво впливає на подальші його результати. Для простоти вважатимемо, що напруга, індукована у вимірювальному витку ВСП, є функцією зміни ЕП та МП у відповідності до одного із можливих радіальних профілів їх розподілу при сталому значенні частоти збудження. Вибірка має повно охоплювати вибрані діапазони зміни електрофізичних параметрів ОК та бути якомога більш рівномірною, що забезпечує максимальний обсяг інформації щодо топології поверхні відгуку, необхідний для її ефективної апроксимації.

Тому має сенс використовувати комп'ютерний план експерименту, створений на основі ЛП_τ-послідовностей Соболя [23, 24]. Для прикладу розрахунку даних вибірки використовувалися вихідні дані з табл. 3, але значення ЕП та МП приповерхневої зони матеріалу варіювалися в діапазоні $\pm 30\%$ від базових значень останнього шару ОК, які приймалися рівними $\sigma_{s1} = 3.495 \times 10^6$ См/м та $\mu_{r51} = 10$. На рис. 9 зображено комбінації варіацій значень електрофізичних характеристик матеріалу приповерхневого шару ОК, отримані при використанні ξ_1 та ξ_2 послідовностей Соболя. Частота збудження в розрахунках дорівнювала 2500 Гц, вибір значення якої обумовлений діапазоном найбільшої чутливості індукованої напруги до зміни профілів електрофізичних параметрів матеріалу ОК. При моделюванні ЕП та МП першого шару ОК були сталими, а шарів з 2-го по 51-й включно – задавалися відповідно до функції гіперболічного тангенса.

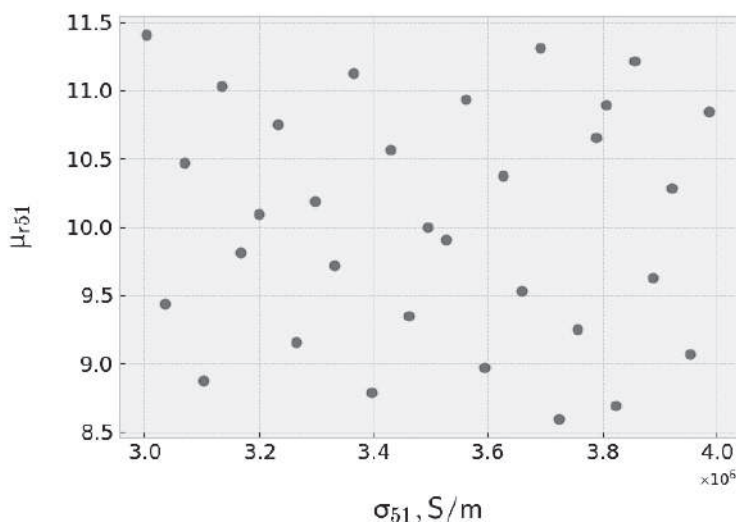


Рис. 9. Комбінація варіацій значень електрофізичних параметрів матеріалу приповерхневого шару ОК

В табл. 6 наведено результати обчислень вихідного сигналу ВСП для сформованої сукупності вхідних даних. Для наочності було вибрано невеликий обсяг точок комп'ютерного плану чисельних експериментів. На практиці

кількість точок плану потрібно вибирати із міркувань забезпечення максимальної точності відтворення сурогатною моделлю топології багатовимірної в загальному випадку поверхні відгуку.

Таблиця 6

Результати обчислень індукованої напруги у вимірювальному витку прохідного ВСП

№	$\sigma_{s1}, \times 10^6 \text{ См/м}$	μ_{r51}	Амплітуда, $\times 10^{-2} \text{ В}$	Фаза, Рад
1	3.49500	10.00	2.98097	1.45573
2	3.75713	9.25	2.91591	1.45260
3	3.23288	10.75	3.04545	1.45901
4	3.62606	10.38	3.00729	1.45474
5	3.10181	8.88	2.89974	1.45809
...
14	3.56053	10.94	3.05222	1.45573
15	3.03628	9.44	2.94652	1.45954
16	3.52777	9.91	2.97287	1.45534
17	3.00352	11.41	3.10143	1.46202
18	3.26564	9.16	2.91895	1.45698
...
28	3.85542	11.22	3.06670	1.45279
29	3.33117	9.72	2.96243	1.45705
30	3.06905	10.47	3.02737	1.46046
31	3.59330	8.97	2.89688	1.45377
32	3.80627	10.89	3.04287	1.45319

Висновки

Таким чином, навчальну вибірку може бути використано для побудови сурогатної моделі одним із відомих методів апроксимації, наприклад нейронними мережами. В результаті сурогатна модель виконує функції носія априорних відомостей щодо ОК при багатопараметрових

вимірюваннях методом вихрових струмів. Якщо ввести в метамодель додаткову інформацію щодо радіуса ОК та вихідної напруги ВСП, індукованої для цього ОК на різних частотах збудження, то це дає можливість значно спростити вимірювальну частину досліджуваної задачі.

Восстановление поверхностных радиальных профилей электрофизических характеристик цилиндрических объектов при вихретоковых измерениях с наличием априорных данных. Формирование выборки для построения суррогатной модели

В.Я. Гальченко, В.В. Тычков, А.В. Сторчак, Р.В. Трембовецкая

Черкасский государственный технологический университет, бул. Шевченко, 460, 18006, Черкассы, Украина
v.tychkov@chdtu.edu.ua

Аннотация

Показана перспективность решения многопараметровой обратной задачи вихретоковых измерений – задачи идентификации радиальных профилей электрофизических характеристик цилиндрических объектов контроля аппроксимационным методом, который предполагает использование априорной информации об испытаниях объектов, полученной в результате математического моделирования. Выполнена постановка задачи, определены основные этапы ее эффективного решения. Представлена универсальная математическая модель процесса

измерений, создан комплекс программ ее реализации в среде Python 3. Расчетами на тестовых моделях для простых случаев, когда известны аналитические решения, доказана адекватность созданного программного обеспечения. С использованием комплекса программ проведена серия численных экспериментов, которые показали возможность различения видов профилей распределения материальных характеристик объектов моделирования. Выполнен подготовительный этап построения аппроксимационной суррогатной модели для случая зависимости выходного сигнала вихретокового преобразователя от электрической проводимости и магнитной проницаемости при фиксированной частоте возбуждения, заключающийся в создании компьютерного плана эксперимента на основе ЛП_τ-последовательностей Соболя и формировании обучающей выборки на базе “точной” электродинамической модели.

Ключевые слова: электрическая проводимость; магнитная проницаемость; поверхностный профиль; вихретоковые измерения; восстановление; обратная электродинамическая задача; суррогатная модель.

Reconstruction of surface radial profiles of the electrophysical characteristics of cylindrical objects during eddy current measurements with a priori data. The selection formation for the surrogate model construction

V. Halchenko, V. Tychkov, A. Storchak, R. Trembovetska

Cherkasy State Technological University, blvd. Shevchenko, 460, 18006, Cherkasy, Ukraine
v.tychkov@chdtu.edu.ua

Abstract

The prospects of solving the multi-parameter inverse problem of eddy current measurements are shown. This problem is the identification of the radial profiles of the electrophysical characteristics of cylindrical control objects by the approximation method. The method involves the use of a priori information about the testing objects obtained as a result of mathematical modelling. The problem statement is completed, the main stages of its effective solution are determined. A universal mathematical model of the measurement process is presented, a set of programs for its implementation in the Python 3 is created. The adequacy of the created software is proved by calculations on the test models for simple cases when analytical solutions are known. A series of numerical experiments using a set of programs are carried out. The experiments have shown the possibility of distinction of distribution profile types of material characteristics of modelling objects. The preparatory stage of constructing an approximation surrogate model for the case of the dependence of the output signal of the eddy current probe on the electrical conductivity and magnetic permeability at a fixed excitation frequency has been completed. The preparatory stage includes the Design of Computer Experiment creation based on Sobol's LP_τ-sequences and the formation of training sample based on an “accurate” electrodynamic model. The ways of generalization to more complex cases of solving measurement problems are indicated.

Keywords: electrical conductivity; magnetic permeability; surface profile; eddy current measurements; reconstruction; inverse electrodynamic problem; surrogate model.

Список літератури

1. Дорофеев А.Л. Вихревые токи. Москва: Энергия, 1977. 72 с.
2. Беда П.И., Сапунов В.М., Поляков А.И., Путников Ю.Г. Методические рекомендации по применению вихретоковых измерителей электрической проводимости для контроля свойств материалов деталей авиационной техники. Люберцы, 13 ГНИИ Минобороны России. Вып. № 6519. 1992. 108 с. URL: <https://ru.b-ok.cc/book/2995249/84367d>
3. Лидер А.М., Ларионов В.В., Гаранин Г.В. Новые возможности вихретокового метода: исследование модификации свойств наводороженных металлов под действием ионизирующего излучения. *Вестник науки Сибири*. 2012. № 3(4). С. 49–54.
4. Березюк Б.М., Марікуца У.Б., Свірідова Т.В. Розв'язання задачі багатопараметричного контролю металевих виробів змінно-частотним методом вихрових струмів. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. 2006.

- № 564: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. С. 67–71. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/38791>
5. Горкунов Б.М., Борисенко Е.А., Шибан Тамер, Шахин Иссам. Электромагнитный преобразователь с пространственно-периодическим полем для систем многопараметрового контроля. *Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ "ХПИ". 2018. № 26(1302). Т. 1. С. 80–85. doi:10.20998/2413-4295.2018.26.12
 6. Gorkunov B.M., Lvov S.G., Borisenko E.A. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing. *Системи обробки інформації*. 2018. Вип. 4. С. 92–97. doi: 10.30748/soi.2018.155.12
 7. Горкунов Б.М., Львов С.Г., Шибан Т., Борисенко Е.А. Экспериментальные исследования вихретокового преобразователя с пространственно-периодическими полями. *Метрологія та прилади*. 2018. № 4(72). С. 45–50. doi: 10.33955/2307-2180(4)2018.45-50
 8. Горкунов Б.М., Тищенко А.А. Метод суперпозиции при определении глубины упроченного слоя вихретоковым методом. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*: сб. науч. тр. Темат. вып.: Электроэнергетика и преобразовательная техника. Харьков: НТУ "ХПИ". 2011. № 19. С. 94–97.
 9. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Побудова зворотної функції перетворення приладів вихреструмного багатопараметрового контролю. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2011. Т. 47. № 3. С. 103–108.
 10. Тетерко А.Я., Гутник В.І. Концепція побудови апаратури багатопараметрового вихреструмного контролю. Відбір і обробка інформації: Міжвід. зб. наук. пр. 2010. Вип. 33(109). С. 9–14.
 11. Тетерко А.Я., Гутник В.І., Луценко Г.Г., Тетерко А.А. Метод многопараметровых вихретоковых измерений толщины, электропроводности материала и толщины диэлектрического покрытия элементов конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 3. С. 55–60.
 12. Ayad A., Benhamida F., Bendaoud A., Le Bihan Y., Bensetti M. Solution of Inverse Problems in Electromagnetic NDT Using Neural Networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, vol. 87, no. 9a, pp. 330–333.
 13. Burkhardt J. Determination of the conductivity and thickness of conductive layers on conductive base materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11, issue 7, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019854234>
 14. Chen X., Lei Y. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. *NDT E Int.*, 2015, vol. 75, pp. 33–38. doi: 10.1016/j.ndteint.2015.06.005
 15. Lahrech A.C., Abdelhadi B., Feliachi M., Zaoui A., Naïdjate M. Electrical conductivity identification of a carbon fiber composite material plate using a rotating magnetic field and multi-coil eddy current sensor. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2018, vol. 83, no. 2. Article Number 20901. doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2018170411>
 16. Theodoulidis T. Impedance of a coil above a planar conductor with an arbitrary continuous conductivity depth profile. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 2019, vol. 59, no. 4, pp. 1179–1185. doi: 10.3233/JAE-171122
 17. Yin W., Peyton A.J. Determining the Step-change Conductivity Profile within Layered Metal Structures Using Inductance Spectroscopy. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Sorrento, 2006, pp. 2127–2131. doi:10.1109/IMTC.2006.328503
 18. Батищев В.И., Мелентьев В.С., Иванов Ю.М. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики: монография. Москва: Инновационное машиностроение, 2018. 460 с.
 19. Синявський А.Т. Математичні моделі для підвищення ефективності оцінки параметрів неоднорідних середовищ за відомим розподілом розсіяного електромагнітного поля: дис... д.т.н. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. Львів, 2016. 436 с.
 20. Денисов П.А., Абрамян А.Л., Жлоба Ю.А., Лукьянова Н.Ю., Малахова Е.А., Шайхутдинов Д.В. Решение обратных задач идентификации постоянных магнитов: состояние вопроса. *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 9(1). С. 23–27.
 21. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 28–38. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.05
 22. Гальченко В.Я., Трёмбовецька Р.В., Тичков В.В. Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2018. № 74. С. 60–72. doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72
 23. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V., Storchak A.V. Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current

- probes. *Przegląd elektrotechniczny*, 2019, no. 9, pp. 76–82. doi:10.15199/48.2019.09.15
24. Гальченко В.Я., Якимов А.Н. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роєм частиц: учеб. пос. Черкассы: ФЛП Третьяков А.Н., 2015. 160 с.
25. Koliskina V. Analytical and quasi-analytical solutions of direct problems in eddy current testing: doctoral thesis In Partial Fulfilment of the Requirements of the Doctor Degree in Mathematics [Subdiscipline of Mathematical modelling]. Riga: Riga Technical university, 2013. 193 p.
26. Kolyshkin A.A., Vaillancourt R. Analytical solution to eddy current testing of cylindrical problems with varying properties. *Canadian Applied Mathematics Quarterly*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 349–360.
27. Nestor C.W. Jr., Dodd C.V., Deeds W.E. Analysis and computer programs for eddy current coils concentric with multiple cylindrical conductors. United States: ORNL-5220, 1979. 135 p.
28. Uzal E. Theory of eddy current inspection of layered metals. 1992. 182 p.
29. Dodd C.V., Deeds W.E. Analytical solutions to eddy-current probe coil problems. United States: NSA-22-002271, 1967. 41 p. doi:10.2172/4499902
30. Dodd C.V., Luquire J.W., Deeds W.E., Spoeri W.G. Some eddy-current problems and their integral solutions. United States: NSA-23-024407, 1969. 89 p. doi:10.2172/4783007
- References**
1. Dorofeev A.L. *Vihrevye toki* [Eddy currents]. Moscow, Energy Publ., 1977. 72 p. (in Russian).
2. Beda P.I., Sapunov V.M., Poljakov A.I., Putnikov Ju.G. Metodicheskie rekomendacii po primeneniju vihretokovyh izmeritelej jelektricheskoy provodimosti dlja kontrolja svojstv materialov detalej aviacionnoj tehniki [Guidelines for the use of eddy current conductivity meters to control the properties of materials of parts of aircraft]. *13th Research Institute of the Ministry of Defense of Russia*. Lyubertsy, 1992, no. 6519. 108 p. Available at: <https://ru.b-ok.cc/book/2995249/84367d>
3. Lider A.M., Larionov V.V., Garanin G.V. Novye vozmozhnosti vihretokovogo metoda: issledovanie modifikacii svojstv navodorozhennyh metallov pod dejstviem ionizirujushhego izluchenija [New features of the eddy current method: investigation of modification of the properties of hydrogenated metals under the influence of ionizing radiation]. *Bulletin of science of Siberia*, 2012, no. 3(4), pp. 49–54. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/16056>
4. Berezjuk B.M., Marikuca U.B., Sviridova T.V. Rozvjazannja zadachi bagatoparametrichnogo kontrolju metallevih virobiv zminno-chastotnim metodom vihrovih strumiv [Solving the problem of multi-parameter control of metal products by the alternating-frequency method of eddy currents]. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, 2006, no. 564, pp. 67–71. Available at: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/38791>
5. Gorkunov B., Borisenko E., Shaiban Tamer, Shahin Issam. Electromagnetic transducer with spatially-periodical field structure for multi-parameter inspection systems. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv, NTU KhPI, 2018, 26(1302), 1, pp. 80–85 (in Russian). doi:10.20998/2413-4295.2018.26.12
6. Gorkunov B.M., Lvov S.G., Borisenko E.A. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing. *Information processing systems*, 2018, no. 4, pp. 92–97. doi:10.30748/soi.2018.155.12
7. Gorkunov B.M., Lvov S.G., Shiban T., Borisenko E.A. Jeksperimental'nye issledovanija vihretokovogo preobrazovatelja s prostranstvenno-periodichesкими poljami [Experimental studies of eddy current converter with space-periodic fields]. *Metrology and Instruments*, 2018, no. 4(72), pp. 45–50 (in Russian). doi: 10.33955/2307-2180(4)2018.45-50
8. Gorkunov B.M., Tishhenko A.A. Metod superpozicii pri opredelenii glubiny uprochnennogo sloja vihretokovym metodom [Superposition method for determining the depth of the hardened layer by the eddy current method]. NTU “KhPI”: *Sat. scientific tr. Subject. no.: Electric Power Engineering and Conversion Engineering*. Kharkiv, NTUU KPI, 2011, no. 19, pp. 94–97. Available at: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/15716>
9. Teterko A.Ja., Gutnyk V.I. Pobudova zvorotnoi' funkcii' peretvorennja prykladiv vyhrostrumovogo bagatoparametrovogo kontrolju [Construction of the inverse function of transformation of devices of eddy current multi-parameter control]. *Physico-chemical mechanics of materials*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 103–108. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2011_47_3_17
10. Teterko A.Ja., Gutnyk V.I. Koncepcija pobudovy aparatury bagatoparametrovogo vyhrostrumovogo kontrolju [Concept of construction of multivariable eddy current control equipment]. *Information Selection and Processing: Interspace. Sat. of sciences*. 2010, no. 33(109), pp. 9–14. Available at: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/16217>
11. Teterko A.Ja., Gutnyk V.I., Lucenko G.G., Teterko A.A. Metod mnogoparametrovyh vihretokovyh izmerenij tolshhiny, jelektroprovodnosti materiala i tolshhiny dijelektricheskogo pokrytija jelementov konstrukcij [The method of multi-parameter eddy current measurements of the thickness, electrical conductivity of the material and the thickness of the dielectric coating of structural

- members]. *Technical diagnostics and non-destructive testing*, 2014, no. 3, pp. 55–60. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TDNK_2014_3_8
12. Ayad A., Benhamida F., Bendaoud A., Le Bihan Y., Bensetti M. Solution of Inverse Problems in Electromagnetic NDT Using Neural Networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, vol. 87, no. 9a, pp. 330–333. Available at: <http://pe.org.pl/articles/2011/9a/71.pdf>
 13. Burkhardt J. Determination of the conductivity and thickness of conductive layers on conductive base materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11, no. 7, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019854234>
 14. Chen X., Lei Y. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. *NDT E Int.*, 2015, vol. 75, pp. 33–38. doi: 10.1016/j.ndteint.2015.06.005
 15. Lahrech A.C., Abdelhadi B., Feliachi M., Zaoui A., Naïdjate M. Electrical conductivity identification of a carbon fiber composite material plate using a rotating magnetic field and multi-coil eddy current sensor. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2018, vol. 83, no. 2. Article Number 20901. doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2018170411>
 16. Theodoulidis T. Impedance of a coil above a planar conductor with an arbitrary continuous conductivity depth profile. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 2019, vol. 59, no. 4, pp. 1179–1185. doi: 10.3233/JAE-171122
 17. Yin W., Peyton A.J. Determining the Step-change Conductivity Profile within Layered Metal Structures Using Inductance Spectroscopy. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Sorrento, 2006, pp. 2127–2131. doi: 10.1109/IMTC.2006.328503
 18. Batishhev V.I., Melentev V.S., Ivanov Ju.M. *Апроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики* [Approximation methods and systems of industrial measurements, control, testing, diagnostics]. Moscow: Innovative Engineering, 2018. 460 p. (in Russian).
 19. Synjavskij A.T. *Математичні моделі для підвищення ефективності оцінки параметрів неоднорідних середовищ за відомим розподілом розсіяного електромагнітного поля*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Mathematical models for increasing the efficiency of estimating the parameters of inhomogeneous media by the known distribution of the scattered electromagnetic field. Dr. tech. sci. diss.]. Lviv, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2016. 436 p. (in Ukrainian).
 20. Denisov P.A., Abraamjan A.L., Zhloba Ju.A., Lukjanova N.Ju., Malahova E.A., Shajhut-dinov D.V. Reshenie obratnykh zadach identifikacii postojannykh magnitov: sostojanie voprosa [The solution of inverse problems of identification of permanent magnets: state of the issue]. *Modern high technology*, 2016, no. 9(1), pp. 23–27. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36171>
 21. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 28–38. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.05
 22. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Zastosuvannja nejrokomputyngna na etapi pobudovy metamodelej v procesi optymal'nogo surogatnogo syntezy anten [The neurocomputing using of the development metamodels stage in the optimal surrogate antennas synthesis process]. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. Radioaparotobuduvan.*, 2018, no. 74, pp. 60–72 (in Ukrainian). doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72
 23. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V., Storchak A.V. Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes. *Przegląd elektrotechniczny*, 2019, no. 9, pp. 76–82. doi:10.15199/48.2019.09.15
 24. Halchenko V.Ya., Jakymov A.N. *Populyaczionnye metaevristicheskie algoritmy optimizaczi roem chasticz* [Population metaheuristic algorithms for particle swarm optimization]. A training manual. Cherkasy: FLP A. Tretyakov, 2015. 160 p. (in Russian).
 25. Koliskina V. Analytical and quasi-analytical solutions of direct problems in eddy current testing: doctoral thesis In Partial Fulfilment of the Requirements of the Doctor Degree in Mathematics [Subdiscipline of Mathematical modelling]. Riga, Riga Technical university, 2013. 193 p.
 26. Kolyshkin A.A., Vaillancourt R. Analytical solution to eddy current testing of cylindrical problems with varying properties. *Canadian Applied Mathematics Quarterly*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 349–360.
 27. Nestor C.W. Jr., Dodd C.V., Deeds W.E. Analysis and computer programs for eddy current coils concentric with multiple cylindrical conductors. United States: ORNL-5220, 1979. 135 p.
 28. Uzal E. Theory of eddy current inspection of layered metals. 1992. 182 p.
 29. Dodd C.V., Deeds W.E. Analytical solutions to eddy-current probe coil problems. United States: NSA-22-002271, 1967. 41 p. doi:10.2172/4499902
 30. Dodd C.V., Luquire J.W., Deeds W.E., Spoeri W.G. Some eddy-current problems and their integral solutions. United States: NSA-23-024407, 1969. 89 p. doi: 10.2172/4783007