

УДК 620.179.14

НЕЛІНІЙНА АДАПТИВНА МОДЕЛЬ ЩОДО ЗАДАЧ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОМЕТРІЇ

© Тетерко А. Я., Гутник В. І., 2000

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

Дано розв'язок оберненої задачі багатопараметрового вихрострумowego контролю параметрів дефектів. Для підвищення точності оцінок введено процедуру адаптації нелінійної функції перетворення системи "Вихрострумний первинний перетворювач - об'єкт контролю" (прямої та оберненої) шляхом послідовної локалізації області моделювання.

Оцінка параметрів дефектів представляє інтерес як в задачах діагностики стану різноманітних деталей та конструкцій, так і у процесі виробництва для контролю якості матеріалів, заготовок та готової продукції. Для поверхневих дефектів типу тріщин важливими, зокрема, є визначення глибини їх розкриття та нахилу до поверхні, для підповерхневих - оцінка глибини залягання та основних розмірів. Найбільш ефективним методом дефектометрії поверхневих та приповерхневих (до 5-7 мм) шарів матеріалів є вихрострумний метод (ВС). Проте багатопараметровість задач дефектометрії, що характеризується нелінійним та взаємозалежним впливом параметрів системи "Вихрострумний первинний перетворювач - об'єкт контролю" (ВСПП-ОК), робить їх розв'язок проблематичним. В результаті методи дефектометрії в теорії ВС контролю практично не розроблено [1, 2].

В роботі на прикладі математичного моделювання задачі оцінки параметрів циліндричного включення в електропровідному півпросторі представлено загальний підхід до розв'язання задач багатопараметрової ВС дефектометрії та ефективний метод підвищення точності контролю параметрів дефекту шляхом введення процедури адаптації моделі системи ВСПП-ОК.

Методика моделювання. В основу моделювання покладено концепцію вирішення проблематики багатопараметрового ВС контролю, що ґрунтується на побудові нелінійної багатопараметрової (НЛБ) моделі функції перетворення системи ВСПП-ОК, як прямої, так і оберненої [3]. При цьому пряма та обернена НЛБ модель функції перетворення системи ВСПП-ОК адитивного чи мультиплікативного типу може бути побудована за єдиним підходом, за яким використовується розв'язок відповідної прямої задачі та дані фізичного і натурного експериментів

[4]. Моделювання у повному обсязі, починаючи від дослідження прямої задачі до використання експериментальних даних заданої системи ВСПП-ОК, принципово дозволяє побудувати адекватну модель системи, що розробляється. Дослідження на основі розв'язку прямої задачі, у свою чергу, надає можливість всебічно проаналізувати вплив багатьох параметрів системи, оптимізувати метод відбору та обробки первинної інформації, побудови ВСПП і формування багатовимірного відгуку, що суттєво зменшує і спрощує експериментальний етап розробки. В даній роботі моделювання проводиться на основі розв'язку прямої задачі щодо поля сформованого поздовжнім циліндричним включенням радіусом a , яке занурено під поверхнею електро-провідного неферромагнітного півпростору на глибині $h \geq a$ (рис. 1). Розв'язок відповідної задачі у строгій постановці дано в роботі [5] і представлено у вигляді рядів функцій Бесселя, які швидко збігаються. Необхідно зауважити, що дослідження саме цієї задачі має важливе значення і принципові переваги. Так, в [6] показано, що із задовільною точністю (для підповерхневих дефектів похибка є меншою 1% за модулем) поле поздовжнього дефекту довільної форми в перерізі можна представити на основі довгохвильового наближення шляхом лінійної суперпозиції полів елементарних відбивачів по контуру дефекту (тріщина довільної форми та орієнтації) чи по його об'єму. Як такий відбивач приймається циліндричне включення, радіус якого на 1-3 порядки менший від довжини хвилі електромагнітного поля в матеріалі. Така модель дозволяє практично в реальному часі проводити обчислення полів дефектів різної конфігурації, що неможливо досягти на основі відомих розв'язків прямих задач ВС дефектоскопії, зокрема, методом інтегральних рівнянь [7, 8].

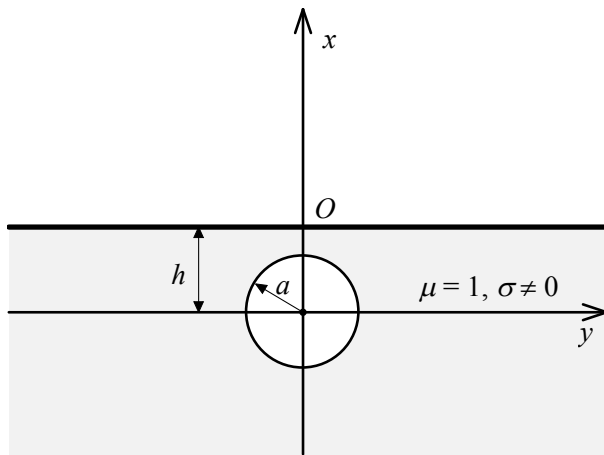


Рис. 1. Дослідження дефекту циліндричної форми.

нітного поля H_{ay} , сформованого циліндричним включенням в епіцентральної точці ($x = h; y = 0$) від його радіуса та залишкової товщини, які представлено через узагальнені параметри

$$a^* = a\sqrt{\omega\sigma\mu_0}, \quad h_{зал}^* = h_{зал}\sqrt{\omega\sigma\mu_0}, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова частота електромагнітного поля, σ - питома електрична провідність матеріалу, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна стала, $h_{зал} = (h - a)$. Інтервал зміни параметрів включення розбито рівномірно і він становить по радіусу включення $a^* = 0,1(0,1)1,0$; а по залишковій товщині $h_{зал}^* = 0(0,055)0,55$.

На рис.2 представлено в комплексній площині (Re, Im) залежність напруженості аномального маг-

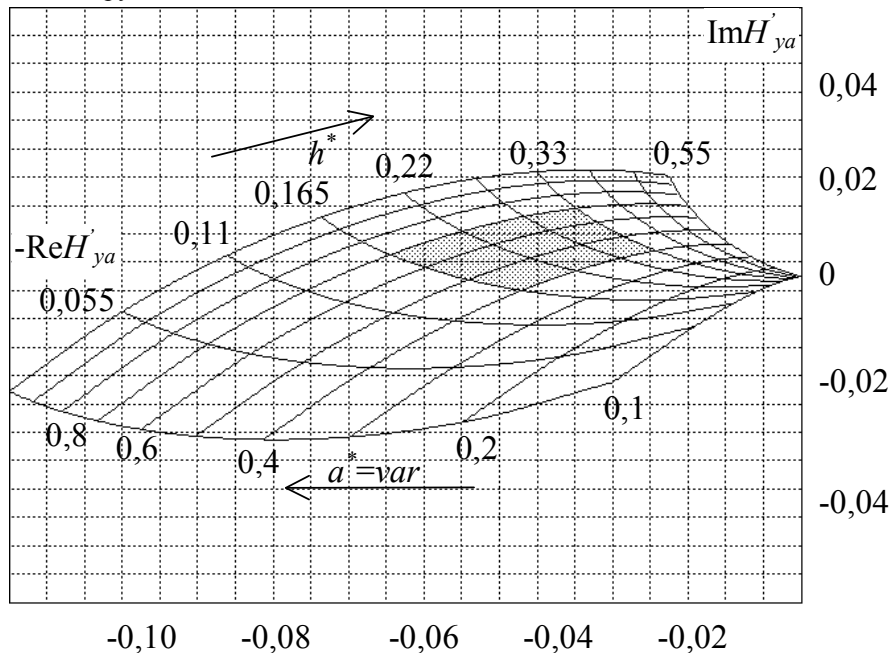


Рис. 2. Залежність складових аномального поля циліндричного включення в епіцентральної точці від радіуса включення a^* та залишкової глибини $h_{зал}^*$.

Залежності $H_{ay}(a^*)$ при $h_{зал}^* = const$ та $H_{ay}(h_{зал}^*)$ при $a^* = const$ представлено відповідними кривими. Значення напруженості аномального поля дано у відношенні до нормального поля на поверхні півпростору $H'_{ya} = H_{ya} / H_{yn}$.

Задача полягає в тому, щоб по вектору інформаційних параметрів аномального поля визначити вектор параметрів дефекту. В загальному випадку вектор інформаційних параметрів та вектор параме-

трів системи ВСПП-ОК є багатовимірними, тобто

$$y = (y_1, \dots, y_n)^T; \quad x = (x_1, \dots, x_n)^T. \quad (2)$$

В задачі, що розглядається, як інформаційні параметри прийнято нормовані значення квадратурних складових вектора напруженості аномального поля в епіцентральної точці. Складовими вектора параметрів включення є його радіус та залишкова товщина, які представлені у виді (1), а саме:

$$y = (\text{Re}H'_{ya}; \text{Im}H'_{ya})^T; x = (a^*; h^*_{зал})^T. \quad (3)$$

При розв'язанні оберненої задачі виділяється два класи глобальних перетворень багатовимірною сигналу ВСПП, яким відповідають два класи моделей [3]: 1) - модель функції перетворення системи ВСПП-ОК, представленій у виді $Ax = y$, де A - оператор, що здійснює відображення простору параметрів об'єкта контролю у простір інформаційних параметрів, та 2) - модель оберненої функції перетворення системи ВСПП-ОК $x_i = \varphi_i(y)$, $i = 1, \dots, n$, у базисі складових y_1, y_2, \dots, y_n вектора інформаційних параметрів. У першому випадку вектор x чи деякі з параметрів ОК знаходять в результаті розв'язку системи нелінійних рівнянь, у другому - система перетворення сигналу ВСПП моделює обернену функцію перетворення системи ВСПП-ОК для заданого x_i параметра ОК, і таким чином, відтворює на виході значення x_i .

Нелінійні моделі складових відгуку ВСПП $\hat{y}_j = f_j(x)$, $j = 1, \dots, n$ та оберненої функції перетворення $\hat{x}_i = \varphi_i(y)$ будуються за єдиним підходом, як наближення функцій багатьох змінних у заданій області [4]. Зазначені моделі представимо у виді багатовимірних поліномів, степінь яких покладемо не вище 2:

$$\hat{y}_j = k_{0j} + k_{1j} \cdot a^* + k_{2j} \cdot h^* + k_{3j} \cdot a^* \cdot h^* + k_{4j} \cdot a^{*2} + k_{5j} \cdot h^{*2}; \quad (4a)$$

$$\hat{x}_i = p_{0i} + p_{1i} \cdot \text{Re}H' + p_{2i} \cdot \text{Im}H' + p_{3i} \cdot \text{Re}H' \cdot \text{Im}H' + p_{4i} \cdot (\text{Re}H')'^2 + p_{5i} \cdot (\text{Im}H')'^2, \quad (4б)$$

де для спрощення запису опущено нижні індекси складових аномального поля.

Коефіцієнти моделей (4) визначаємо з обчислювального експерименту на основі розв'язку нормальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь [4]

$$Q = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y = M^{-1} \cdot X^T \cdot y, \quad (5)$$

де Q - вектор невідомих коефіцієнтів моделей; X - матриця незалежних змінних моделей в області наближення W , побудована відповідно до представлення (4). Значення множини складових вектор-стовпця $\{y_v\}$, $v = 1, \dots, m$ обчислюють на основі розв'язку прямої задачі по m точках, що охоплюють область зміни параметрів моделі [4, 9]. При цьому розв'язок (5) отримується при мінімізації середньоквадратичного відхилення

$$\rho(y, \hat{y}) = \left(\sum_{v=1}^m (y - \hat{y})^2 \right)^{1/2}; \rho(x_i, \hat{x}_i) = \left(\sum_{v=1}^m (x_i - \hat{x}_i)^2 \right)^{1/2}, \quad (6)$$

яке характеризує похибку наближення.

Звернемо увагу на те, що розглянуті моделі можуть бути побудовані на основі експериментальних даних. При цьому постановка експерименту для побудови різних класів моделей характеризується принциповими відмінностями. Так, для побудови моделі $Ax = y$ необхідний набір зразків ОК із відомими значеннями вектора x параметрів ОК в m точках області моделювання, що є аналогічним до представленого вище обчислювального експерименту. Для побудови моделі оберненої функції перетворення системи ВСПП-ОК необхідні тільки значення заданого параметра x_i в діапазоні його зміни при орієнтовних оцінках значень всіх інших параметрів ОК в області їх зміни, що в багатьох випадках надає цій моделі переваги. Однак для задач аналізу з метою оптимізації розв'язку оберненої задачі необхідним є одночасне дослідження обох класів моделей системи ВСПП-ОК.

Адаптивна модель в оберненій задачі дефектометрії. Ефективність розв'язку обернених задач ВС контролю визначається точністю моделі, яка описує систему ВСПП-ОК. При цьому із зростанням розмірності моделі, що обумовлюється вимогами покращення її точності чи збільшення кількості параметрів ОК, вплив яких враховується, побудова моделі може стати проблематичною через нестійкість розв'язку при визначенні коефіцієнтів моделі [10, 11]. Конструктивним рішенням щодо забезпечення заданої точності моделі є введення процедури адаптації моделі шляхом послідовної локалізації області моделювання

$$\hat{y}^{(k)} = f^{(k)}(x); \hat{x}_i^{(k)} = \varphi_i^{(k)}(u); W_j^{(k)} \in W_j^{(k-1)}; \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, N,$$

де $W_j^{(k)}$ - область, для якої будується модель для j -того експерименту на k -ому кроці.

В табл. 1, 2 представлено результати обчислень коефіцієнтів адаптивної моделі обох класів, що розглядаються, стосовно задачі визначення параметрів циліндричного включення. При цьому область $W^{(1)}$ охоплює весь діапазон зміни параметрів моделей, зазначених вище і відображених відповідними залежностями на рис. 2 на основі обчислень розв'язку прямої задачі [5]. Далі здійснюється локалізація області (заштриховано на рис. 2) в околі значень $a^* = 0,6$; $h^*_{зал} = 0,2$ так, що для області $W_j^{(2)}$ діапазон зміни параметрів становить $\{a^* \pm 25\%; h^*_{зал} \pm 50\%\}$, а для області $W_j^{(3)}$ - $\{a^* \pm 10\%; h^*_{зал} \pm 25\%\}$. Діапазон зміни параметрів розбито рівномірно і модель побудовано по 100 точ-

ках, а також по 25 точках в областях $W_j^{(2)}$ та $W_j^{(3)}$. Питання ефективності розбиття області моделювання тут не розглядається, тому що у практичних задачах воно вирішується достатньо довільно в залежності від можливостей виготовлення відповідного до параметрів ОК комплекту взірців. Коефіцієнти в таблицях представлено для моделей різного порядку - від лінійної, що поступово ускладнюється, до другого порядку, представленої залежностями (7). Останнє надає можливість оцінки ваги окремих членів повної моделі щодо доцільності їх урахування. В таблицях представлено значення середньоквадратичного відхилення моделі у відношенні до норми відповідного параметра $(\|Re H'\|, \|Im H'\|, \|a^*\|, \|h^*\|)$ в області моделювання. Очевидно, що нелінійність моделі та її адаптація щодо області моделювання вирішальним чином впливають на точність. В цілому відносне СКВ моделі від точних значень з прямої задачі змінюється від десятків відсотків для лінійної моделі та всього інтервалу $W^{(1)}$ зміни параметрів до десятих долей відсотку для адаптованої моделі другого порядку. Зауважимо, що в табл. 1, 2 складність моделі позначено умовно (1, 2, 3, 4), зокрема, лінійній моделі відповідає 1, а повній моделі другого порядку - 4.

На основі аналізу представлених даних відмітимо такі основні важливі результати адаптації моделі системи ВСПП-ОК.

1) адаптація моделі функції перетворення системи, прямої чи оберненої, шляхом локалізації області моделювання дозволяє ефективно розв'язувати задачі підвищення точності моделі, чи зменшення похибки оцінки параметрів, що контролюються. Вихідна модель може охоплювати значну область зміни параметрів системи, при цьому з наступними кроками похибка адекватності моделі може бути зменшена у 5-10 разів;

2) ускладнення моделі від лінійної до другого

порядку дозволяє практично у 5-10 разів зменшити похибку адекватності моделі. В загальному різні стратегії можуть передбачати на певному кроці адаптації побудову моделей різного порядку;

3) модель оберненої функції перетворення системи характеризується в цілому більшою точністю у порівнянні з моделлю прямої функції перетворення. При цьому в результаті перетворення отримується безпосередньо значення заданого параметра ОК, яке є незалежним (з певною похибкою) від зміни інших, тоді як при використанні менш точної моделі прямої функції перетворення для визначення параметрів ОК необхідний додатково розв'язок системи нелінійних рівнянь з множини таких моделей. Менша похибка моделі оберненої функції системи обумовлюється характером базисних векторів моделі (4 б), які нелінійно залежать від параметрів ОК. Тому використання інших класів функцій, окрім багатовимірного полінома, покращує ефективність побудови моделі системи [4].

Принциповий підхід щодо підвищення точності багатопараметрового контролю введенням процедури адаптації НЛБ моделі системи, розглянутий на прикладі двопараметрової задачі дефектометрії, розповсюджується в загальному на задачі ВС контролю (структуроскопії, товщинометрії та дефектоскопії) більших розмірностей. При цьому набуває вирішального значення аналіз інформаційних параметрів системи ВСПП-ОК з точки зору їх лінійної незалежності, тобто аналіз моделей функції перетворення системи. Система багатопараметрового контролю, яка побудована із застосуванням адаптивних моделей, реалізується з використанням програмних та сучасних апаратних засобів розв'язку систем алгебраїчних рівнянь, а в окремих задачах селективного ВС контролю (контроль тільки одного з параметрів ОК) може бути реалізована виключно апаратними засобами.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів моделі функції перетворення системи ВСПП-ОК для моделей різної складності та області моделювання.

Складність моделі	Коефіцієнти моделі				Відносне СКВ, %			
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	$Re H$	$Im H$
Область наближення $W^{(1)}$ (по 100 тчк.)								
1	-0.04979 -0.02617	-0.05713 0.01942	0.14913 0.06824				14	40
2	-0.02706 -0.01989	-0.09728 0.00834	0.06119 0.04396	0.15653 0.04322			10	38
3	-0.01273 -0.01592	-0.16483 -0.01038	0.05798 0.04307	0.16091 0.04443	0.06000 0.01663		9.3	38
4	-0.02384 -0.02808	-0.16015 -0.00526	0.18507 0.18218	0.15520 0.03818	0.05758 0.01398	-0.24579 -0.26904	3.2	14
Область наближення $W^{(2)}$ (по 100 тчк.)								
1	-0.05739 -0.02845	-0.05521 0.02630	0.18336 0.09397				2.1	14
2	-0.03996 -0.02322	-0.08440 0.01755	0.09520 0.05753	0.14790 0.04434			1.7	14
3	-0.01733 -0.02006	-0.16131 0.00678	0.09312 0.05724	0.15176 0.04488	0.06357 0.00889		1.5	14
4	-0.02954 -0.03420	-0.15524 0.01380	0.21017 0.19280	0.14390 0.03577	0.05957 0.00426	-0.28202 -0.32662	0.12	1.7
Область наближення $W^{(2)}$ (по 25 тчк.)								
1	-0.05764 -0.02855	-0.05511 0.02583	0.18366 0.08429				2.4	17
2	-0.04052 -0.02427	-0.08364 0.01871	0.09805 0.06292	0.14270 0.03561			2.0	17
3	-0.01985 -0.02279	-0.15475 0.01360	0.09804 0.06292	0.14270 0.03561	0.05925 0.00425		2.0	17
4	-0.02975 -0.03426	-0.15475 0.01360	0.21120 0.19402	0.14270 0.03561	0.05925 0.00425	-0.28288 -0.32775	0.16	2.05
Область наближення $W^{(3)}$ (по 100 тчк.)								
1	-0.05725 -0.02725	-0.05464 0.02699	0.18323 0.08070				0.52	4.3
2	-0.03942 -0.02208	-0.08445 0.01835	0.09349 0.05467	0.15002 0.04351			0.42	4.3
3	-0.01630 -0.01903	-0.16133 0.00818	0.09143 0.05440	0.15363 0.04399	0.06325 0.00841		0.4	4.3
4	-0.02982 -0.03435	-0.15429 0.01616	0.20917 0.18792	0.14519 0.03443	0.05892 0.00318	-0.28229 -0.32013	0.014	0.26
Область наближення $W^{(3)}$ (по 25 тчк.)								
1	-0.05736 -0.02721	-0.05457 0.02681	0.18337 0.08069				0.6	5.4
2	-0.03999 -0.02310	-0.08352 0.01994	0.09652 0.06010	0.14474 0.03432			0.52	5.4
3	-0.01898 -0.02197	-0.15404 0.01618	0.09652 0.06010	0.14474 0.03432	0.05876 0.00314		0.52	5.4
4	-0.02993 -0.03439	-0.15404 0.01618	0.20959 0.18829	0.14474 0.03432	0.05876 0.00314	-0.28265 -0.32049	0.02	0.32

Таблиця 2 - Значення коефіцієнтів моделі оберненої функції перетворення системи ВСПП-ОК для моделей різної складності та області моделювання.

Складність моделі	Коефіцієнти моделі				Відносне СКВ, %			
	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	a^*	h^*
Область моделювання $W^{(1)}$ (по 100 тчк.)								
1	0.1023 0.3595	-9.5293 2.6831	18.897 5.7148				10	19
2	0.0982 0.3561	-8.6003 3.4667	29.472 14.635	179.21 151.18			6.6	12
3	0.0792 0.3830	-9.7185 5.0552	30.013 13.866	195.11 128.60	-11.621 16.508		6.5	11
4	0.1169 0.3737	-6.3103 4.2123	23.659 15.436	52.513 163.82	21.163 8.410	254.247 -62.803	5.1	11
Область моделювання $W^{(2)}$ (по 100 тчк.)								
1	0.05106 0.32924	-8.75496 2.81751	18.7822 5.4430				1.96	4.16
2	0.00455 0.29354	-9.38673 2.33247	3.0429 14.3751	206.211 158.320			0.96	1.65
3	-0.00555 0.38583	-9.74424 5.59562	30.7511 11.4381	212.168 103.948	-3.0785 28.0993		0.97	0.89
4	0.15830 0.37020	-3.41512 5.07738	16.0565 12.6412	-16.147 122.643	47.1764 23.9843	328.338 -26.885	0.36	0.88
Область моделювання $W^{(2)}$ (по 25 тчк.)								
1	0.0518 0.3298	-8.8241 2.7906	18.8713 5.4361				2.5	5.0
2	0.0077 0.2974	-9.3575 2.3968	30.7716 14.2211	211.526 156.151			1.18	1.96
3	-0.0181 0.3880	-10.2812 5.6227	31.5867 11.3741	226.676 103.236	-7.969 27.834		1.21	1.14
4	0.1849 0.3753	-3.3883 5.1927	16.2451 12.3312	-15.073 118.319	47.451 24.376	337.967 -21.086	0.46	1.13
Область моделювання $W^{(3)}$ (по 100 тчк.)								
1	0.04258 0.32564	-8.59104 2.89841	19.413 5.725				0.5	1.0
2	-0.02159 0.27758	-9.72338 2.05048	32.031 15.174	232.872 174.382			0.21	0.4
3	-0.02651 0.38298	-9.89292 5.68878	32.189 11.790	235.815 111.237	-1.4454 31.0197		0.21	0.13
4	0.19325 0.35658	-3.17187 4.88168	15.362 13.811	-13.237 141.145	49.7449 24.8725	356.468 -42.806	0.05	0.11
Область моделювання $W^{(3)}$ (по 25 тчк.)								
1	0.04207 0.32572	-8.61640 2.89034	19.483 5.733				0.6	1.3
2	-0.02232 0.27951	-9.74111 2.08306	32.371 14.984	238.552 171.225			0.26	0.5
3	-0.04023 0.38523	-10.3622 5.7493	32.929 11.687	249.008 109.508	-5.3131 31.3624		0.27	0.16
4	0.19378 0.35807	-3.1478 4.9120	15.333 13.729	-13.791 140.009	49.9503 24.9485	361.649 -41.873	0.06	0.15

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / Под ред. В. В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1995. - 387 с.
2. Неразрушающий контроль. В 5-ти кн. Кн. 3: Электромагнитный контроль / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. - М.: Высш. шк., - 320 с.
3. Тетерко А. Я. Узагальнення побудови моделі багатомірнього сигналу в обернених задачах вихрострумового контролю // Фізичні методи та засоби контролю матеріалів і виробів "Леотест-99": Матеріали наук.-техн. конф. - Київ; Львів, 1999. - С. 70.
4. Тетерко А. Я. Створення нелінійної моделі відгуку первинного перетворювача для селективного електромагнітного контролю // ФХММ. - 1996. - № 6. - С. 93-103.
5. Тетерко А. Я. Электромагнитное поле цилиндричного включения в электропроводящем полупространстве // Отбор и обработка информации. - 1989. - Вып.4. - С. 26-30.
6. Тетерко А. Я. Довгохвильове наближення поля повздожнього дефекту в задачах вихрострумової дефектоскопії // Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці. - Черкаси: Вид. ІУБ. - 1998. - Вип.6. - С.61-68.
7. Панасюк В. В., Саврук М. П., Назарчук З. Т. Метод сингулярных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции. - Киев: Наук. думка, 1984. - 344 с.
8. Назарчук З. Т., Тетерко А. Я., Овсянников О. И. Рассеяние электромагнитного поля тонким включением в электропроводящем полупространстве // Отбор и обработка информации. - 1989. - Вып.4. - С. 26-30.
9. Тетерко А. Я., Пахольок Т. З. Методика моделювання та аналіз багатопараметрової моделі сигналу електромагнітних систем неруйнівного контролю // ФХММ. - 1996. - № 5. - С. 77-81.
10. Никольский С. М. Приближение функций многих переменных и теоремы вложения. - М.: Наука, 1977. - 456 с.
11. Тихонов А. Н. Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1986. - 288 с.