

## РАДІОХВИЛЕВИЙ МЕТОД НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ З ВРАХУВАННЯМ ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У ВИПРОМІНЮВАЧІ

Представлено результати дослідження радіохвильових методів неруйнівного контролю. Розроблено метод визначення електрофізичних параметрів контрольованих об'єктів на основі даних зі штучної нейронної мережі, що використовується в радіохвильовому дефектоскопі, на основі зразкових об'єктів. Враховано розподіл внутрішніх механічних напружень у щільній антені, яка використовується у дефектоскопі як випромінювач та приймач електромагнітних хвиль, що дає змогу підвищити точність вимірювань електрофізичних параметрів об'єкта та виявляти неоднорідності з різним кутом нахилу.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, штучна нейронна мережа, внутрішні механічні напруження, щільна антена.

**Вступ.** Радіохвильові методи неруйнівного контролю (НК) ґрунтуються на проникаючих властивостях радіохвиль від дециметрового до міліметрового діапазону. Призначення радіохвильової дефектоскопії – виявлення дефектів та неоднорідностей у структурі контрольованих об'єктів і визначення типів і розмірів матеріалів. Радіохвильовий метод НК використовується в задачах товщинометрії, дефектоскопії та визначення електрофізичних параметрів плоскошарових діелектричних об'єктів для НК-турбінних валів, авіаційних двигунів, нафтотвердлинних труб, з чого постає проблема забезпечення точності вимірювань у різних температурних режимах роботи дефектоскопа.

На сьогодні в НВЧ-діапазоні як випромінювачі найчастіше використовують рупорні антени, при цьому мікрохвилі проникають у виріб і після підсилення реєструються приймальним пристроєм. Розроблення нових компактних пристроїв для неруйнівного тестування матеріалів є актуальним [1].

Широке застосування ЕОМ та створення на їх базі нового методу проведення досліджень – обчислювального експерименту істотно розширює клас ефективно розв'язуваних задач та сприяє проведенню експерименту в коротші строки і з меншими затратами ресурсів, ніж фізичний експеримент. Основна проблема при цьому – вибір між детальністю опису явищ і можливістю ефективно провести числові експерименти в реальному часі. Чим точніше враховуються процеси у явищі, тим складнішими стають його математичний опис та комп'ютерна модель і тим важче отримати при цьому кількісну інформацію.

**Аналіз останніх досліджень.** Амплітудно-фазова дефектоскопія базується на явищі впливу об'єктів та неоднорідностей у них на електромагнітні хвилі, які відбиваються та проходять крізь контрольований об'єкт [2]. На практиці цей метод при односторонньому доступі до контрольованого об'єкта реалізується шляхом його опромінення електромагнітними хвилями під кутом до його поверхні, за допомогою випромінювачів з еліптичною поляризацією [3, 4]. При цьому апертуру приймально-передавальної антени розміщують всередині діелектричної пласти, приймають відбиті електромагнітні сигнали, і за результатами вимірювань визначають наявність дефектів. Опромінення контрольованого об'єкта електромагнітним сигналом через ді-

електричну пластину зводить до мінімуму відбиття від її зовнішньої поверхні і відповідно до мінімального рівня збудження поверхневих хвиль, що забезпечує підвищення роздільної здатності виявлення дефектів. Також відомі способи, у яких застосовуються приймально-передавальні поляризовані антени, що дає змогу забезпечити можливість виявлення сторонніх металевих або діелектричних дефектів у контрольованих об'єктах [5].

Недоліками згаданих вище методів є наявність двох випромінювачів, що зменшує надійність системи та точність вимірювань, оскільки визначення наявності дефекту відбувається шляхом порівняння сигналів, що поступають з окремо взятих випромінювачів, між собою. Таким чином, якщо подібні за властивостями дефекти знаходяться в зоні опромінення двох антен, вони можуть бути не виявлені.

Також відомі методи мікрохвильового НК композитних матеріалів, які дають змогу визначати відносну діелектричну проникність матеріалів шляхом прийому відбитого від об'єкта електромагнітного сигналу [6]. Цей метод полягає у використанні зразків матеріалів з відомими електрофізичними параметрами. Цей метод знайшов застосування для визначення термальних дефектів у контрольованих об'єктах, а також дефектів у структурі матеріалу контрольованого об'єкта та вирішує проблему ідентифікації шляхом порівняння прийнятого сигналу з існуючою базою сигналів, що відповідають зразковим матеріалам. Проте в цьому методі присутній недолік конструкційної складності та, внаслідок того, що він застосовується для визначення термальних дефектів, постає проблема збереження точності вимірювань за різних температурних режимів.

Виходячи з результатів аналізу методів [3-6], можна зробити висновок про доцільність розробки нового високоточного методу радіохвильової дефектоскопії при односторонньому доступі до контрольованого об'єкта з можливістю визначення наявності та характеру неоднорідностей (глибини залягання, розмірів та кута нахилу), а також електрофізичних параметрів контрольованого об'єкта (діелектричної проникності та товщини). У зв'язку з широким спектром галузей застосування дефектоскопу, виникає необхідність збереження точності за температурних впливів зовнішнього середовища на випромінювач.

Поставлено завдання розробити модель випромінювача, підвищити точність методу радіохвильової дефектоскопії та зменшити трудомісткість процесу навчання штучної нейронної мережі (ШНМ), що пов'язана з великою кількістю експериментів для створення навчальної вибірки. З метою впровадження функції ідентифікації контрольованого об'єкта потрібно розробити базу даних з інформацією про характеристики різних класів зразкових об'єктів.

**Комп'ютерна модель щільного випромінювача.** Для використання в ролі первинного вимірювального перетворювача інформаційного сигналу від контрольованого об'єкта з неоднорідністю розроблено двополяризаційний щільний випромінювач (ДЩВ) у вигляді метало-діелектричної структури, що дає змогу зменшити конструкційну складність дефектоскопу. Особливістю цього ДЩВ є його одночасна робота з двома взаємно перпендикулярними поляризаціями, що дає змогу істотно покращити параметри розпізнавання конструктивних особливостей та властивостей матеріалу контрольованого об'єкта [1].

ДЩВ складається з металевого екрана зі щілинною лінією та прилеглим шаром діелектрика товщиною  $h$  і відносною діелектричною проникністю  $\varepsilon$  (рис. 1, а). Щілинний випромінювач складається з двох частин (щілина  $\Psi_1$  та щілина  $\Psi_2$ ), кожна з яких має свою резонансну частоту і поляризацію:  $\Psi_1$  має резонансну частоту  $f_1 = 3.8$  ГГц і вертикальну поляризацію випромінювання, а  $\Psi_2$  має  $f_2 = 3$  ГГц і горизонтальну поляризацію.  $\Psi_1$  та  $\Psi_2$  мають довжини  $\lambda_1/2$  та  $\lambda_2/2$ ,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – довжини хвилі у  $\Psi_1$  та  $\Psi_2$  відповідно.  $\Psi_1$  та  $\Psi_2$  з'єднані паралельно у точці збудження, та працюють у режимі короткого замикання (рис. 1, б).

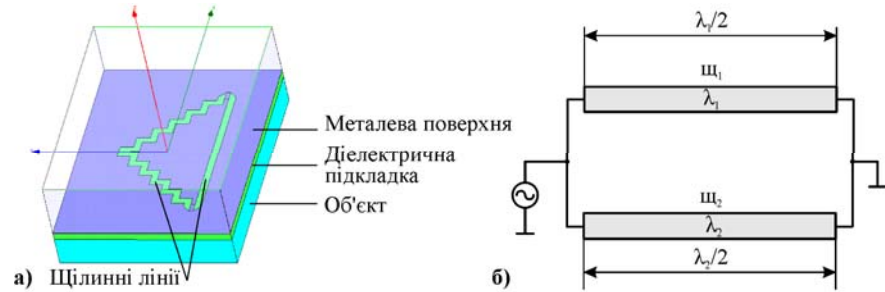


Рис. 1. Модель ДЩВ та її еквівалентна схема

Для моделювання електромагнітних випромінювачів існує ряд засобів, а саме електромагнітні 3D-симулятори, які використовують різні методи моделювання: CST/MWS (FDTD/FIT), Ansoft/HFSS (FEM), AWR/MWO EM-Sight (MoM), Flomerics/EMC/FLO (TLM), FEKO (MoM/FEM), IE3D (MoM). У [7] наведено результати аналізу особливостей застосування найбільш поширених з них при моделюванні планарних випромінюючих структур на базі щілинних ліній передачі. Найкращі результати отримані в Ansoft HFSS завдяки простоті процесу створення моделі та точності отриманих результатів.

Як контрольований об'єкт використано діелектричні пластини різної товщини та з різним характером неоднорідностей (вертикальне або горизонтальне розташування). Для моделі ДЩВ отримано залежність  $S_{11}$  у смузі частот без об'єкта та за наявності двох зразкових об'єктів (рис. 2).

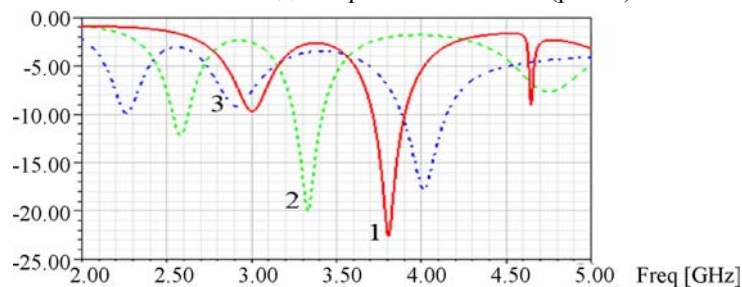


Рис. 2. Частотні залежності  $S_{11}$  ДЩВ: 1 – без об'єкта; 2 – з об'єктом товщиною 2 мм; 3 – з об'єктом товщиною 7 мм

У цьому випадку, спостерігається зменшення резонансних частот щілинного випромінювача зі збільшенням товщини зразкового об'єкта, резонансні частоти ДЩВ за товщини об'єкта 2 мм  $f_1' = 3,33$  ГГц,  $f_2' = 2,58$  ГГц, а резонансні частоти ДЩВ за товщини об'єкта 7 мм  $f_1'' = 2,92$  ГГц, а  $f_2'' = 2,26$  ГГц.

На рис. 3 представлено результати дослідження впливу неоднорідностей, які являють собою горизонтальну та вертикальну тонкі металеві нитки.

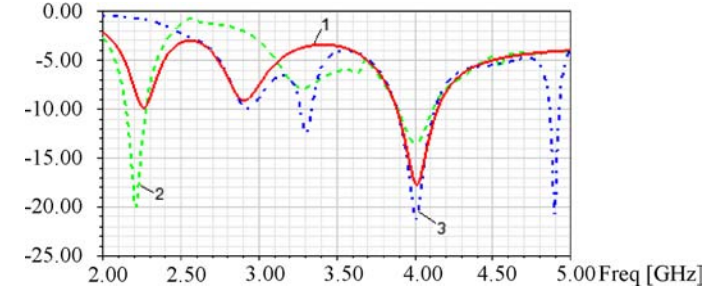


Рис. 3. Частотні залежності  $S_{11}$  ДЩВ: 1 – об'єкт товщиною 7 мм без неоднорідності; 2 – об'єкт з вертикальною неоднорідністю; 3 – об'єкт з горизонтальною неоднорідністю

На рис. 3 спостерігається вплив характеру неоднорідності на величину  $S_{11}$  в області частот  $f_1''$  та  $f_2''$ .

**Врахування впливу внутрішніх механічних напружень у ДЩВ.**

Випромінювач – це двошарова структура, що складається зі шару діелектрику та прилеглого до нього металевого шару з коефіцієнтами лінійного розширення  $\beta_1$  та  $\beta_2$  відповідно. У разі зміни температурного режиму, внаслідок різниці коефіцієнтів теплового розширення, у випромінювачі виникають внутрішні механічні напруження (ВМН). Розподіл таких напружень можна отримати методом спекл-інтерферометрії [8, 9]. Ці напруження викликають нелінійність розширення випромінювача:

$$\varepsilon_t = \int_0^t \beta^*(t_1) dt_1, \tag{1}$$

де:  $\varepsilon_t$  – температурна деформація;  $\beta^*(t_1)$  – коефіцієнт нелінійного розширення двошарової структури при температурі  $t_1$ ;  $t_1$  – поточна температура ( $0 \leq t_1 \leq t$ ). Коефіцієнт температурного розширення  $\beta^*(t_1)$  враховує вплив ВМН, що виникають внаслідок температурного розширення у двошаровій структурі ДЩВ, на коефіцієнти лінійного температурного розширення  $\beta_1$  та  $\beta_2$ . Для моделювання ВМН у ДЩВ використано метод смужок [10].

Для кожного зразкового об'єкта створюється окремий клас. Для врахування температурного впливу знімаються частотні залежності  $S_{11}$  усіх зразкових об'єктів в кожному температурному режимі з діапазону робочих температур дефектоскопу (-50...+90 °C). Зняті частотні характеристики  $S_{11}$  утворюють сімейства S-параметрів кожного класу зразкових об'єктів.

На рис. 4-6 представлено сімейства  $S$ -параметрів щільного випромінювача без об'єкта (рис. 4), з об'єктом товщиною 7 мм (рис. 5) та з об'єктом з горизонтальною неоднорідністю (рис. 6).

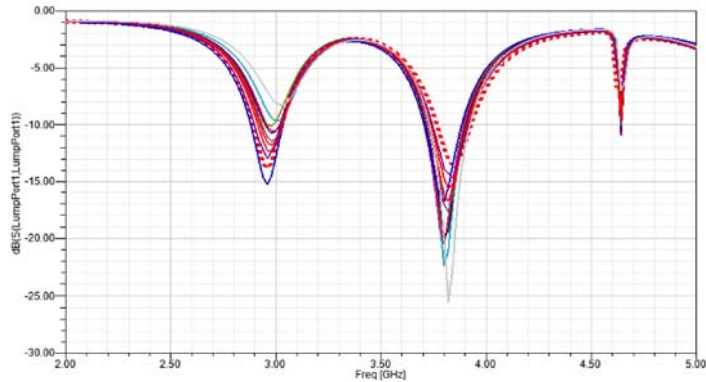


Рис. 4. Частотні залежності  $S_{11}$  ДЩВ без об'єкта

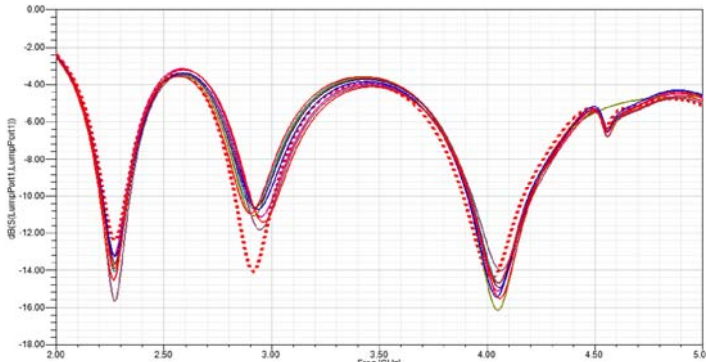


Рис. 5. Частотні залежності  $S_{11}$  ДЩВ з об'єктом товщиною 7мм

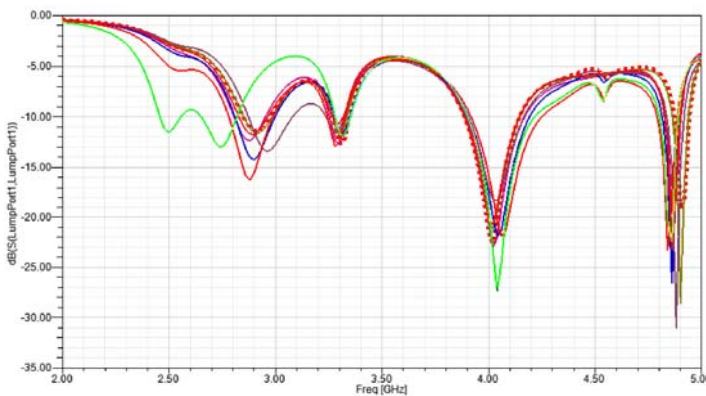


Рис. 6. Частотні залежності  $S_{11}$  ДЩВ з об'єктом, що містить горизонтальну неоднорідність

За створеними сімействами  $S$ -параметрів, що утворюють класи об'єктів, проводиться навчання ШНМ, а також забезпечується врахування температурних впливів на роботу ДЩВ, що підвищує точність методу НК.

**Результати навчання ШНМ.** Для задачі ідентифікації об'єктів на основі сімейств  $S_{11}$  використано ШНМ прямого поширення зі зворотнім поширенням похибки. Навчальними вибірками для ШНМ було використано сімейства  $S$ -параметрів трьох різних класів об'єктів (рис. 4-6).

Було проведено аналіз декількох алгоритмів навчання з різними значеннями параметрів. Найкращими виявились такі: Traingda (алгоритм градієнтного спуску з адаптивним навчанням), Traingdx (метод градієнтного спуску зі врахуванням моментів і з адаптивним навчанням), Trainpr (пороговий алгоритм зворотного поширення). Ці алгоритми характеризуються такими параметрами: граничне значення критерію навчання (Performance), мінімальне значення градієнта (Gradient), максимальна кількість ітерацій (Epoch), гранична тривалість навчання (Time), максимально допустимий рівень перевищення помилки контрольної підмножини порівняно з навчальною (Validation Checks).

На рис. 7-9 представлено результати навчання ШНМ.

На рис. 7, а; 8, а; 9, а зображено залежності зміни похибки навчання від кількості виконаних ітерацій, на рис. 7, б; 8, б; 9, б представлено отримані параметри функцій навчання ШНМ. Порівняльний аналіз результатів навчання ШНМ функціями Traingda, Traingdx та Trainpr представлено в табл. 1.

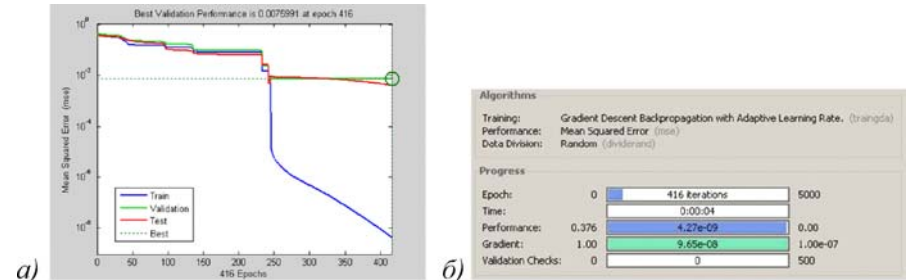


Рис. 7. Результати навчання ШНМ функцією Traingda

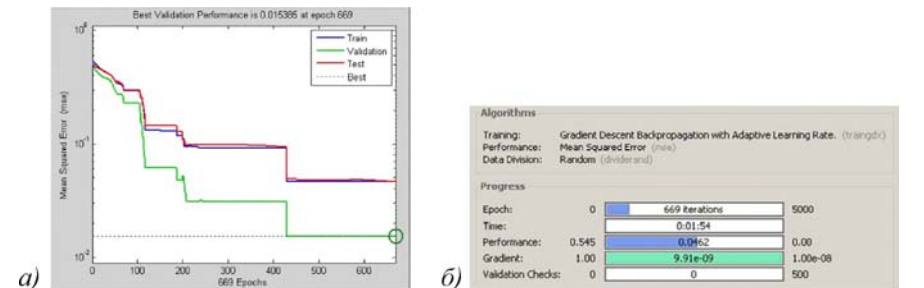


Рис. 8. Результати навчання ШНМ функцією Traingdx



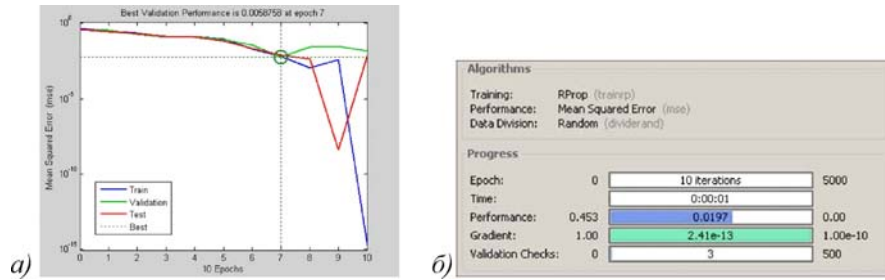


Рис. 9. Результати навчання ШНМ функцією Trainrp

Табл. 1. Результати навчання ШНМ

Функція навчання	Traingda	Traingdx	Trainrp
Кількість ітерацій	416	669	10
Тривалість	0:04	01:54	0:01
Гradient	9,65 e-08	9,91 e-09	2,41 e-13

Враховуючи отримані значення критерію навчання: 4,27 e-09 для навчання за допомогою Traingda, та 0,0462 для Traingdx можна зробити висновок, що перша виявилася точніша та процедура навчання була швидшою і тривала 416 ітерацій протягом 4 с. У випадку алгоритму Trainrp найменше значення граничного критерію навчання становить 0,0197. В усіх трьох випадках процедура навчання припинялася в разі виконання умови досягнення мінімального значення градієнта.

Робота ШНМ перевірялася на чотирьох тестових сигналах Inp<sub>1-4</sub>. Inp<sub>1-3</sub> відповідають трьом класам об'єктів, сімейства характеристик S<sub>11</sub> яких зображено на рис. 4-6. Тестовий сигнал Inp<sub>4</sub> відповідає об'єкту, що містить вертикальну неоднорідність.

Табл. 2. Результати перевірки роботи ШНМ

	Traingda				Traingdx				Trainrp			
	Inp <sub>1</sub>	Inp <sub>2</sub>	Inp <sub>3</sub>	Inp <sub>4</sub>	Inp <sub>1</sub>	Inp <sub>2</sub>	Inp <sub>3</sub>	Inp <sub>4</sub>	Inp <sub>1</sub>	Inp <sub>2</sub>	Inp <sub>3</sub>	Inp <sub>4</sub>
y <sub>1</sub>	0,9999	0,0	0,0	0,0	1,0	0	0	0	1,0	0,0	0,0	0
y <sub>2</sub>	0,0	0,9999	0,0	0,9995	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0	0
y <sub>3</sub>	0,0001	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0	0	1,0	1
y <sub>4</sub>	0,0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0	0

Як видно з табл. 2, за значеннями на виходах ШНМ y<sub>i</sub> можна робити висновок про приналежність i-го об'єкта та i-го класу. Чим ближче це значення до заданого під час навчання значення target (у цьому випадку 1), тим більша ймовірність приналежності. Усі три функції навчання забезпечують точне розпізнавання тестових об'єктів, при цьому Traingda і Traingdx не змогли однозначно віднести сигнал Inp<sub>4</sub> до одного з класів.

Розроблений метод навчання нейронної мережі з використанням сімейств параметрів ДЦВ у різних температурних режимах є оптимальним з погляду ресурсозатратності процесу, та забезпечує достатній рівень точності та швидкодію ШНМ. З отриманих результатів видно, що модель ШНМ у ре-

жимі навчання Trainrp може бути використана в реальному часі, що дає змогу швидкого додавання нових класів об'єктів до бази даних під час експлуатації.

**Висновки.** У роботі здійснено моделювання ДЦВ та отримано його частотні характеристики S<sub>11</sub>. Використання ДЦВ з двома поляризаціями дає змогу ідентифікувати об'єкти та виявляти різного характеру неоднорідності.

Розроблений метод враховує вплив внутрішніх механічних напружень у ДЦВ на нерівномірність температурного розширення випромінювача в процесі експлуатації дефектоскопу.

Під час проектування ШНМ було досліджено функції навчання з різними параметрами, що дало змогу вибрати оптимальні. Роботу ШНМ було перевірено на об'єктах за наявності неоднорідностей.

### Література

- Melnychuk A.O. Object detection by precision radiowave defectoscope on the basis of slot radiator with use of artificial neural network / A.O. Melnychuk, R.M. Yakymiv, O.M. Liske // Proc. of International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'11. – Kyiv, Ukraine, September 20-23, 2011.
- Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / за ред. З.Т. Назарчука. – Львів : Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2001. – Вип. 1134. – С. 395.
- Pat. RU 2146045 C1, Int.Cl.7 G 01 N 22/02. Способ электромагнитной дефектоскопии / Орлов А.Б., Орлов К.А., Лукин Э.А., Желяева Л.Э.; заявитель и патентообладатель Орлов А.Б., Орлов К.А., Лукин Э.А., Желяева Л.Э., № 99104385/09; заявл. 03.03.1999; опубл. 27.02.2000.
- Pat. RU 2146047 C1, МПК7 G 01 N 22/02. Способ электромагнитной дефектоскопии / Орлов А.Б., Орлов К.А., Лукин Э.А., Желяева Л.Э.; заявитель и патентообладатель Орлов А.Б., Орлов К.А., Лукин Э.А., Желяева Л.Э., № 99104385/09; заявл. 03.03.1999; опубл. 27.02.2000.
- Pat. RU 2146046 C1, МПК7 G 01 N 22/02. Способ электромагнитной дефектоскопии / Орлов А.Б., Орлов К.А., Лукин Э.А., Желяев Н.Н.; заявитель и патентообладатель Орлов А.Б., Орлов К.А., Лукин Э.А., Желяев Н.Н., № 99104385/09; заявл. 03.03.1999; опубл. 27.02.2000.
- Pat. WO 2007/024948 A1, IPC G01N 22/02 (2006.01). System and method for microwave non-destructive inspection / Safai M. [US], Georgeson G.E. [US]; The Boeing company, 15460 Laguna Canyon Road, № PCT/US2006/032915; International Filing Date 23.08.2006; International Filing Date 01.03.2007.
- Liske O.M. Comparison of computational electromagnetic tools for design and simulation of slot rhombic antenna / O.M. Liske // Матеріали доповідей Міжнародної конференції CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 11th International Conference The Experience of Designing and Application, Поляна-Свалява, 23-25 лютого 2011 р.
- Шугайло Ю.Б. Компьютеризированная система ввода и обработки интерферограмм / Ю.Б. Шугайло, В.К. Жуковский, А.Ю. Попов, А.В. Тюрин // Информационные системы в науке, образовании и технике (ИТОНТ) : тез. док. Третьей Всеукраинской конф. молодых ученых. – Черкассы. – 2002. – С. 281-282.
- Жуковский В.К. Дослідження і діагностика залишкових напружень листових матеріалів / В.К. Жуковский, А.Р. Гохман, А.Ю. Попов // Міжнародна конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "ЕВРИКА-2004" : зб. тез конф. – Львів. – 2004. – С. 145.
- Биргер А.И. Остаточные напряжения / А.И. Биргер. – М. : Изд-во МАШГИЗ. – 1963. – С. 98.

### Якymив Р.Н., Мельничук А.А., Лиске А.Н. Радиоволновой метод неразрушающего контроля с учетом внутренних механических напряжений в излучателе

Представлены результаты исследований радиоволновых методов неразрушающего контроля. Разработан метод определения электрофизических параметров кон-

тролируемых объектов на основе данных из искусственной нейронной сети, используемой в радиоволновом дефектоскопе, на основе образцовых объектов. Учитывается распределение внутренних механических напряжений в щелевой антенне, которая используется в дефектоскопе в качестве излучателя и приемника электромагнитных волн, что дает возможность увеличить точность измерений электрофизических параметров объектов и выявления неоднородностей с различным углом наклона.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, искусственная нейронная сеть, внутренние механические напряжения, щелевая антенна.

**Yakymiv R.M., Melnychuk A.O., Liske O.M. Radiowave Method of non-destructive testing considering internal mechanical stresses in transceiver**

In this paper research results of radio-wave non-destructive testing are presented. Method of electro-physical parameters testing on basis of data received from artificial neural network learned on exemplary objects. Distribution of internal mechanical stresses in slot-line antenna was taken into consideration, what gives possibility to perform measurements with higher precision. Slot-line antenna is used as transceiver, it gives possibility to detect obstacles with different orientation angles.

**Keywords:** non-destructive testing, artificial neural network, internal mechanical stresses, slotline antenna.

## 4. ЕКОНОМІКА, ПЛАНУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ В ГАЛУЗЯХ

УДК 330.322.2(477) Проф. Г.І. Башнянин<sup>1</sup>, д-р екон. наук; доц. О.М. Свінцов<sup>2</sup>, д-р екон. наук; ст. викл. Н.Я. Скірка<sup>2</sup>, канд. екон. наук; доц. П.П. Гаврилко<sup>3</sup>, канд. екон. наук

### ПОДАТКОВІ ІНСТРУМЕНТИ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРНИХ ЗРУШЕНЬ В ІНВЕСТИЦІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Проаналізовано механізм формування бюджетних джерел фінансування інвестиційної діяльності в Україні. Визначено особливості застосування інструментів податкового регулювання інвестиційних процесів у національній економіці.

**Ключові слова:** структурні пропорції, структурні трансформації, податкове регулювання, національна економіка.

**Постановка проблеми.** Оптимальна та ефективна податкова політика держави виступає одним з основних чинників покращення результатів структурної перебудови української економіки. Розвиток ринкових відносин в Україні, інфляційні процеси, необхідність збільшення фінансування соціальних програм супроводжувались зростанням податкового навантаження на платників. За цих умов діюча податкова система потребувала реформ, зокрема в інвестиційній та інноваційній сферах. В Україні зниження ставок оподаткування та надання однакових податкових стимулів для інвесторів не вирішує проблеми із забезпеченням мобільності капіталу в довгостроковій перспективі, поглиблює конфлікт між традиційними та новими видами підприємницької діяльності, для створення яких не вистачає фінансових ресурсів. Відповідно, для здійснення структурних зрушень інноваційного типу в економіці необхідні нові податкові інструменти регулювання випереджаючого зростання інноваційних виробництв.

У вітчизняній літературі дослідженню питань удосконалення податкових інструментів регулювання інвестиційно-інноваційного процесу приділяють значну увагу. Серед українських науковців питання щодо підвищення позитивного впливу інструментів та механізмів оподаткування на інвестиційно-інноваційну активність досліджують: О.Д. Василик [1], А.В. Захарін [3], А.О. Касич [4], М.І. Крупка [5], В.П. Мартиненко [6], В.М. Мельник, Г.С. Мельничук [7], В.І. Панченко [9], Т.В. Черничко [12] та ін. Однак ще й досі не повною мірою досліджено питання, що враховують сьогоднішню економічну ситуацію в країні.

**Методика дослідження.** Метою роботи є дослідження інструментів податкового регулювання структурних зрушень в національній економіці,

<sup>1</sup> Львівська КА;

<sup>2</sup> Дрогобицький державний педагогічний університет ім. Івана Франка;

<sup>3</sup> Ужгородський навчальний центр Київського національного торговельно-економічного університету