



Українське товариство  
неруйнівного контролю та технічної діагностики



Кафедра приладів і систем  
неруйнівного контролю  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

**ДП** мест

Навчальний центр з  
неруйнівного контролю

# НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

МАТЕРІАЛИ

3-ї науково-технічної конференції  
з міжнародною участю  
17 – 19 вересня 2019 року



Київ, Україна  
2019



Ukrainian Society  
for Non-Destructive Testing



Department of Non-Destructive  
Testing Instruments and Systems  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute

**DN** **мечм**  
NDT Training Center  
“DP-TEST”

# NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CONTEXT OF THE ASSOCIATED MEMBERSHIP OF UKRAINE IN THE EUROPEAN UNION

CONFERENCE PROCEEDINGS

3-rd scientific conference with international participation  
September 17 – 19, 2019



Kyiv, Ukraine  
2019

Збірник доповідей науково-технічної конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2019» / Київ, Україна: УТ НКТД, – 2019 – №3, – 61 с.

## ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

### **Почесний голова:**

*Троїцький В.О.*, професор, завідувач відділом Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України, голова Українського товариства НКТД, член Міжнародної академії НК.

### **Голова:**

*Карнаш О.М.*, професор, проректор Івано-Франківського НТУ нафти і газу, заступник голови УТ НКТД.

### **Заступник голови:**

*Протасов А.Г.*, д.п.н., доцент, завідувач кафедри приладів і систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського.

*Карнаш М.О.*, професор, директор НДІ нафтогазової енергетики і екології;

*Хорло М.Ф.*, директор АЦНК ПАТ «ВТП «Укренергочермет»;

*Павлій І. В.*, директор НВФ «Ультракон»;

*Щупак С.О.*, відповідальний секретар ТК №78 «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», керівник групи ІЕЗ ім. Є.О.Патона;

*Козін О.М.*, заступник директора, технічний керівник НВФ «Діагностичні прилади».

### **Виконавча група:**

*Щупак С.О.*, відповідальний секретар ТК №78 «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», керівник групи ІЕЗ ім. Є.О.Патона;

*Поддубченко О.Є.*, заступник директора ПП «ДП-Тест»;

*Лашко О.В.*, керівник навчального центру з неруйнівного контролю ПП «ДП-Тест»

*Лисенко Ю.Ю.*, інженер кафедри ПСНК КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union (NDT-UA 2019): Conference proceedings / Kyiv, Ukraine: USNDT, – 2019 – №3, – 61 pp.

## **ORGANIZING COMMITTEE**

### **General Chairperson:**

*Troitskiy V.O.*, professor, President of Ukrainian Society for NDT, Department Head of the E.O.Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine.

### **Chairperson:**

*Karpash O.M.*, D.Sc., professor, Head of Department, Vice Rector for Research.

### **Technical Program Committee Chairpersons:**

*Protasov A.G.*, D.Sc., professor, Head of Department of Non-Destructive Testing Instruments and Systems Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

*Karpash M.O.*, D.Sc., professor, Director of R&D Institute of Oil and Gas Power Engineering and Ecology;

*Khorlo M.F.*, Director of Attestation Center of NDT at «VTP «Ukrenergochermet»;

*Павлій І. В.*, Director of «Ultracon»;

*Shchupak S.O.*, Department of non-destructive quality control methods of welds № 004, E.O.Paton Electric Welding Institute;

*Kozin O.M.*, technical manager of Tov “Nvf “Diahnostichni Prylady”.

### **Publication Chairpersons:**

*Shchupak S.O.*, Department of non-destructive quality control methods of welds № 004, E.O. Paton Electric Welding Institute;

*Poddubchenko O.E.*, “DP-TEST”

*Lasko O.V.*, Head of NDT Training Center “DP-TEST”

*Lysenko I.I.*, Department of Non-Destructive Testing Instruments and Systems Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

## ЗМІСТ

## TABLE OF CONTENTS

<i>Закладний О.О., Прокопенко В.В., Гребенюк Т.В.</i> МЕТОДИКА ПРИСКОРЕНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ.....	7
<i>Подгорский К.Н., Гликсон И.Л., Бойко С.Ю.</i> К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ТРЕЩИНЫ, ВЫЯВЛЯЕМОЙ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ НА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЯХ АГТД, ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧНОСТИ ИНСПЕКЦИЙ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ.....	10
<i>Momot A.</i> DEFECT CLASSIFICATION IN ACTIVE THERMAL TESTING WITH THE USE OF NEURAL NETWORKS.....	16
<i>Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В.</i> ПОБУДОВА БАГАТОПАРАМЕТРОВОЇ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МЕТАМОДЕЛІ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОБ’ЄМНОЇ СТРУКТУРИ .....	19
<i>Муравйов О. В.</i> ТЕРМОГРАФІЧНА ДІАГНОСТИКА ЯК СУЧАСНИЙ ЗАСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПАТОЛОГІЙ ОРГАНІЗМУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ У МЕДИЦИНІ .....	22
<i>Павлій О.В.</i> СУЧАСНІ ПОРТАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ.....	25
<i>Лашко О.В.</i> ОКРЕМІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ ПРОГРАМ ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА» .....	32

Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко, О.Л. Дугін ВПЛИВ ВИБОРУ ЧАСУ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА РЕЗУЛЬТАТИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЯ.....	38
Овчарук С.А., Баженов В.Г. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ПЛОСКОГО ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РАМКАХ ЗАДАЧ ЦИВІЛЬНОГО РОЗМІНУВАННЯ .....	42
Maievskiy S. RELIABILITY OF TESTING AND ITS DETERMINATION .....	45
Салам Буссі ЕП. Мішел Кассаблі ПОТУЖНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО – АКУСТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ .....	50
Коваленко В.П. ІСТОРІЯ ТА ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ СТАНДАРТУ ДСТУ EN 4179:2017.....	52
Povshenko O., Protasov A., Petryk V. MODELING OF ULTRASONIC SIGNALS IN DIAGNOSTIC DEVICES ....	57

## МЕТОДИКА ПРИСКОРЕНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

*О.О. Закладний, В.В. Прокопенко, Т.В. Гребенюк*  
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний*  
*інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

**Анотація.** Діагностування стану електрообладнання при його виготовленні, ремонті та профілактичних перевірках є невід’ємною частиною технологічного процесу. Приладів для діагностування потребують підприємства промислово-енергетичного комплексу, залізничного й морського транспорту, гірничодобувні, збагачувальні й целюлозно-паперові комбінати, ремонтні заводи і т. ін.

**Вступ.** Асинхронні двигуни (АД), як правило, розраховані на термін служби 15 – 20 років без капітального ремонту, за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією АД розуміється його робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в паспортних даних електродвигуна. Однак у реальному житті має місце значне відхилення від номінальних режимів експлуатації. Це, передусім, низька якість напруги живлення й порушення правил технічної експлуатації: технологічні перевантаження, умови навколишнього середовища (підвищені вологість, температура), зниження опору ізоляції, порушення охолодження.

Наслідком таких відхилень є аварійні режими роботи АД. У результаті аварій щорічно виходять із ладу до 10% застосовуваних електродвигунів. Наприклад, 60% свердловинних електронасосних агрегатів виходять з ладу частіше одного разу на рік. Вихід з ладу АД призводить до важких аварій і значних матеріальних збитків через простої обладнання, затрати на усунення наслідків аварій і ремонт електродвигуна, що вийшов з ладу. Ремонт електричної машини потужністю до 1 кВт обходиться в 750...900 грн. Щоб оцінити вартість ремонту потужнішої машини, треба помножити цю цифру на потужність двигуна. Крім цього, робота на аварійних режимах призводить до підвищеного енергоспоживання та збільшення споживаної реактивної потужності [1].

**Матеріали та результати досліджень.** Залежно від характеру зміни навантаження, розрізняють чотири основних номінальних режими роботи АД: тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний і змішаний. Основною характеристикою навантажувальних режимів є теплова характеристика електродвигуна. Робота АД завжди супроводжується його нагріванням, що зумовлено процесами, які відбуваються в ньому, і втратами енергії. Нормативний термін служби електродвигуна визначається, в остаточному підсумку, припустимою температурою нагрівання його ізоляції.

У сучасних двигунах застосовується кілька класів ізоляції, припустима температура нагрівання яких становить для класу А – 105 °С, Е – 120 °С, В – 130 °С, Р – 155 °С, Н – 180 °С, С – понад 180 °С. Перевищення припустимої температури призводить до передчасного руйнування ізоляції й істотного скороченню терміну роботи двигуна [2].

Аварії АД поділяються на два основних типи механічні й електричні. Механічні аварії – це деформація або поломка вала ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення обпресування осердя ротора, пошкодження бабіту в підшипниках ковзання, руйнування сепаратора, кільця або кульки в підшипниках кочення, поломка крильчатки, відкладення пилу й бруду в рухомих елементах тощо.

Електричні аварії АД, своєю чергою, поділяються на три типи:

- мережеві аварії (аварії за напругою), пов'язані з аваріями в електромережі;

- струмові аварії, пов'язані з обривом провідників в обмотках статора, ротора або кабелю, витковим й фазним замиканням обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних пайкою або зварюванням, аварії, що призводять до пробію ізоляції в результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів переважанню або короткого замикання;

- аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження[3].

Відомі приклади реалізації діагностувальних комплексів для електродвигунів при їх виробничому або післяремонтному випробуванні [4]. Всі вони мають навантажувальні пристрої.

Розроблений діагностувальний комплекс - це програмно-апаратний комплекс, призначений для поточного моніторингу й післяремонтних випробувань, дослідження та аналізу реального стану електромеханічних систем, експериментальної оцінки стану електродвигуна й видачі рекомендацій щодо умов експлуатації діагностованої електричної машини. Стенд визначає параметри електричних машин без сполучення їх з навантажувальними пристроями, що значно знижує трудомісткість випробувань і скорочує час їх проведення.

Стенд визначає номінальні параметри двигуна, значення яких установлені в паспортних даних або технічних умовах (потужність, частоту обертання, струм, ККД, коефіцієнт потужності, максимальний момент, момент інерції двигуна), а також внутрішні параметри (активні та індуктивні опори обмоток, струми і втрати короткого замикання й холостого ходу і ін.).

Система прискореного випробування, діагностування та контролю двигунів у вигляді випробувального стенду на базі адаптивного керування з фаззі-контролерами є новим електротехнічним обладнанням, яке визначає параметри електричних машин без з'єднання їх з навантажувальними пристроями та проводить випробування при зниженій напрузі живлення. Система дозволяє визначити в повному обсязі параметри, характеристики та технологічні показники електродвигунів.

Цикл випробувань складається з послідовної роботи електродвигуна у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу. Випробування проводяться при зниженій напрузі, а тривалість їх складає не більше 10с. Під час випробувань знімаються значення струму двигуна, частоти обертання та вимірюється тривалість режимів короткого замикання, холостого ходу і вільного вибігу.

Пристрій визначає номінальні параметри двигуна ( потужність, частоту обертання, струм і електромагнітний момент) та внутрішні параметри (активний і індуктивний опори двигуна, електромагнітну та електромеханічну сталі часу), а також швидкість ідеального холостого ходу та момент інерції [2].

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму короткого замикання полягає в наступному:

1. осцилографують процес короткого замикання  $i(t)$  при зниженій напрузі;
2. визначають сталі значення струму  $i_{кз}=I_n$ ;
3. знаходять  $T_я$  при  $0,632i_{кз}$ ;
4. розраховують  $R_я = U_x / i_{кз}$  ;
5. визначають  $L_я = T_я R_я$  ;
6. визначають тривалість перехідного процесу  $t_{пн}$  і перевіряють величину  $T_я$ .

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму холостого ходу полягає в наступному:

1. осцилографують процес холостого ходу, тобто зміну струму й швидкості в часі при зниженій напрузі;
2. визначають сталі значення швидкості  $\omega_{0x}$  й  $I_{xx}$  (струм холостого ходу);



3. розраховують конструктивну сталу двигуна  $C_d = U_x / \omega_{0x}$  ;

4. перераховують значення отриманих параметрів на природну характеристику.

Визначають величину  $\omega_n$ .

$$\omega_n = \frac{U_n}{C_d} - \frac{I_n R_{я}}{C_d} = \omega_0 - \frac{I_n R_{я}}{C_d} ;$$

5. визначають тривалість перехідного процесу й знаходять величину  $T_1$ .

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму вільного вибігу полягає в наступному:

1. осцилографують процес вільного вибігу  $\omega(t)$  при зниженій напрузі;

2. визначають тривалість перехідного процесу;

3. розраховують момент інерції  $J$ , електромеханічну сталу двигуна  $T_m$ , сталі  $T_1$  і  $T_2$ , максимальне значення струму  $I_{max}$  і час  $t_{max}$ .

**Висновок.** Розроблена методика прискореного діагностування, яка дозволяє встановити параметри електродвигуна без сполучення його з навантажувальними пристроями, що значно знижує трудомісткість випробувань і скорочує час їх проведення.

Цикл випробувань складається з послідовної роботи електродвигуна у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу. Під час випробувань вимірюються значення струму статора (якоря), частоти обертання й тривалість режимів короткого замикання, холостого ходу й вільного вибігу.

### Література

1. Овчаров В.В., Рижков А.О. Діагностування експлуатаційних режимів роботи і захист асинхронного двигуна за температурою сталі та кратністю сили струму.

2. Закладний О.М., Алтухов Є.І., Прядко С.Л., Смоляр В.Г. Пристрій для прискореного випробування колекторних машин // Вісник НТУУ “КПІ”, серія “Гірництво”, - 2000. Вип. 3. – С. 37-41.

3. Черный А.П., Луговой А.В., Максимов М.Н., Родькин Д.И., Сисюк Г.Ю. Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения // Проблемы створення нових машин і технологій: Наук. праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2000. – Вип. 1(8). – С.150-156.

4. Луговой А.В., Родькін Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2001. – №1. – С.14-16.

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ТРЕЩИНЫ, ВЫЯВЛЯЕМОЙ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ НА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЯХ АГТД, ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧНОСТИ ИНСПЕКЦИЙ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

*Подгорский К.Н., Гликсон И.Л., Бойко С.Ю.  
АО "МОТОР СИЧ", г. Запорожье*

В соответствии с требованиями норм летной годности: европейских EASA и американских FAA, проектирование основных деталей (ОД) авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) предполагает обязательное применение концепции безопасного развития трещины (КБРТ) с учетом допустимости повреждений, т.е. возможного наличия дефекта в наиболее нагруженной зоне ОД.

Периодичность инспекций ОД (процедуры контроля технического состояния ОД) по КБРТ с использованием детерминированного метода определяется как расчетная величина периода развития предполагаемой трещины в критической зоне от начального размера до критического с учетом коэффициента запаса  $K_N$ , согласованного с Компетентным органом (см. рисунок 1).

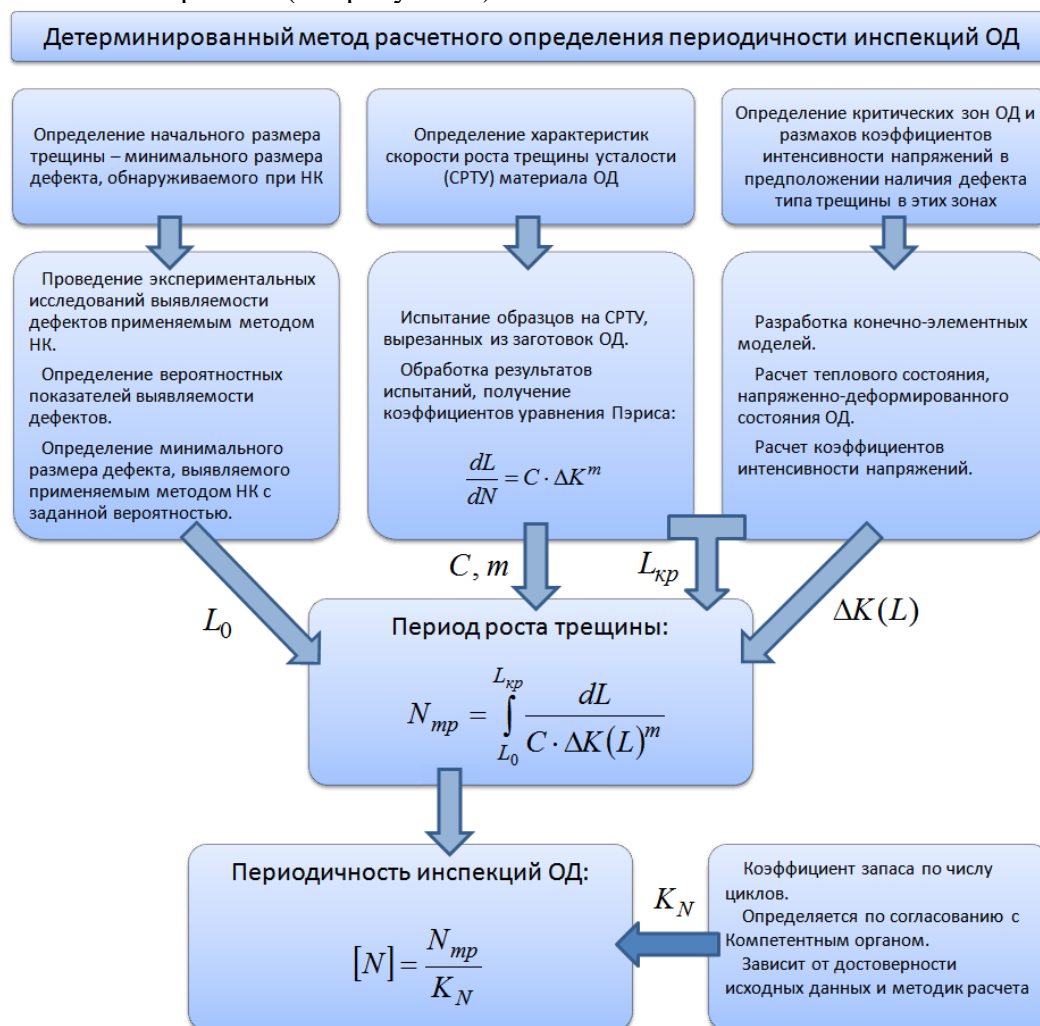


Рисунок 1 – Детерминированный метод расчетного определения периода роста трещины

Величина  $K_N$  определяется многими факторами, такими как достоверность исходных данных и методик расчета периода роста трещины. В общем случае под исходными данными и применяемыми методиками следует понимать:

– нагрузки, действующие в эксплуатационных условиях, включая тепловое состояние ОД на стационарных и переходных режимах работы двигателя (тепловое состояние и другие нагрузки должны быть подтверждены результатами экспериментальных исследований);

– статистически достоверные свойства материала ОД, в том числе характеристики трещиностойкости, определенные на образцах из полуфабриката, предназначенного для изготовления конкретной ОД;

– величину минимального размера дефекта, обнаруживаемого при неразрушающем контроле (НК) ОД, которая, согласно нормативным требованиям (см. ОСТ 1 01207-2012), должна быть определена на основе оценки эффективности НК, применяемого для критической зоны конкретной ОД;

– верифицированную методику определения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), характеризующих напряженное состояние у вершины трещины;

– метод расчета периода роста трещины, учитывающий изменение скорости роста трещины после каждого подцикла нагружения ОД.

Одним из факторов, влияющих на величину периодичности осмотров ОД (и на ресурсные показатели ОД и двигателя в целом), является эффективность НК детали на этапе ее производства, при инспекциях и ремонте. Кривые вероятности обнаружения дефекта для различных зон ОД и методов НК строятся в результате специальных исследований (испытаний [1]), которые проводятся с использованием достаточного для получения статистических оценок количества образцов-эталонов (не менее 60 шт.) с дефектами или трещинами с размерами в диапазоне от заведомо не выявляемых до выявляемых всегда. Специальные испытания проводятся на оборудовании предприятия, осуществляющего контроль ОД при изготовлении, инспекциях и ремонтах. По результатам этих исследований получают вероятностные кривые выявляемости дефектов с определенной величиной доверительной вероятности. Используя эти кривые, для заданной вероятности обнаружения дефекта определяется максимальный размер дефекта, который может быть пропущен при проведении НК данной зоны ОД применяемыми методами НК.

Для определения минимального размера дефекта, обнаруживаемого при капиллярном люминесцентном контроле ЛЮМ1-ОВ (применяемого при НК центробежных колес) на АО «МОТОР СИЧ» были проведены экспериментальные исследования (в соответствии с [1]) с использованием 155 образцов-эталонов (мини-дисков) с нанесенными усталостными трещинами длиной от 1,06 мм до 16,1 мм.

В результате тестового контроля на образцах-эталонах методом ЛЮМ1-ОВ на оборудовании и по технологии, применяемой на АО «МОТОР СИЧ», были обнаружены трещины на 8-ми образцах длиной 1,06...1,25 мм – 4 образца, 1,5 мм – 2 образца, 2,1 мм – 1 образец, 7,7 мм – 1 образец.

По результатам тестового контроля построены кривые вероятности обнаружения трещины методом ЛЮМ1-ОВ для уровней доверительной вероятности 50% и 95% (см. рисунок 2). Начальный размер трещины для расчета периода роста трещины в контролируемых критических зонах ОД, соответствующий минимальному размеру трещины, обнаруживаемой при капиллярном люминесцентном контроле ЛЮМ1-ОВ с вероятностью 90% при доверительной вероятности 95%, составил 3,37 мм (см. таблицу 1).

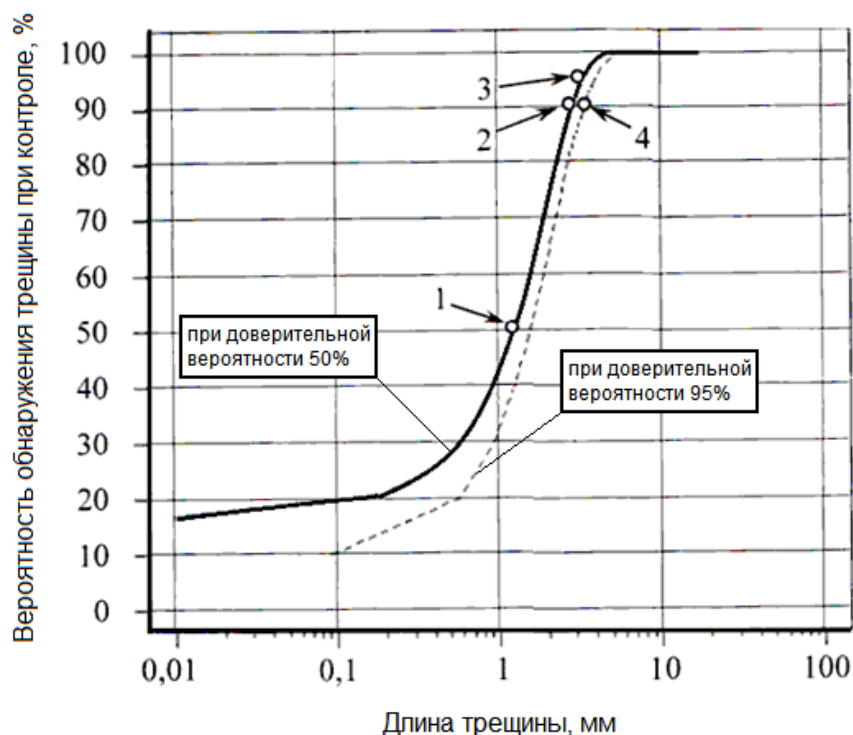


Рисунок 2 – Кривые вероятности обнаружения трещины при контроле ЛЮМ1-ОВ (т. 1...4 – см. таблицу1)

Таблица 1 – Значение величин в точках 1, 2, 3, и 4, отмеченных на рисунке 2

Номер точки на Рисунок 1	Вероятность обнаружения трещины, % / при доверительной вероятности, %	Длина трещины, мм
1	50 / 50	1,22
2	90 / 50	2,85
3	95 / 50	3,31
4	90 / 95	3,37

Методика расчета периодичности инспекций ОД АГТД предусматривает в качестве начального размера трещины использование минимального размера трещины, выявляемой при НК с вероятностью 90% при доверительной вероятности 95%. Минимальный размер трещины, выявляемой с указанным уровнем вероятности методом ЛЮМ1-ОВ на оборудовании и по технологии, применяемой на АО «МОТОР СИЧ», составляет 3,37 мм, что существенно ниже разрешающей способности используемого метода [2] и снижает величину периодичности инспекций ОД, контролируемых этим методом.

Поскольку невыявление трещины длиной 7,7 мм является редким событием, с целью улучшения выявляемости дефектов, надежности контроля и уменьшения размеров, не обнаруживаемых ЛЮМ1-ОВ контролем дефектов, предусмотрены мероприятия по исключению значительного влияния человеческого фактора.

Для оценки характера предполагаемой трещины (раскрытая или плотносжатая) в критической зоне центробежного колеса (ЦБК) после эксплуатации ЦБК расчетным путем определена величина раскрытия трещины: выполнен расчет напряженно-деформированного состояния ЦБК с применением программного комплекса ANSYS в два шага нагружения:

- 1-й шаг – нагужение в рабочих условиях;
- 2-й шаг – разгрузка.

Конечно-элементная модель ЦБК представляет собой циклосимметричный сектор с трещиной в критической зоне – ступице. Фронт трещины выполнен в виде дуги окружности радиусом 2 мм (протяженность трещины на поверхности составляет ~4 мм).

На 1-ом шаге нагужения (в рабочих условиях) на краях трещины в ступичной части ЦБК получены окружные напряжения, которые являются положительными величинами, что свидетельствует о раскрытии трещины (см. рисунок 3).

Окружные перемещения на краях трещины в ступичной части ЦБК, полученные на 1-ом шаге, суммарно составляют 0,05 мм, что также свидетельствует о раскрытии трещины в эксплуатационных условиях (см. рисунок 4).

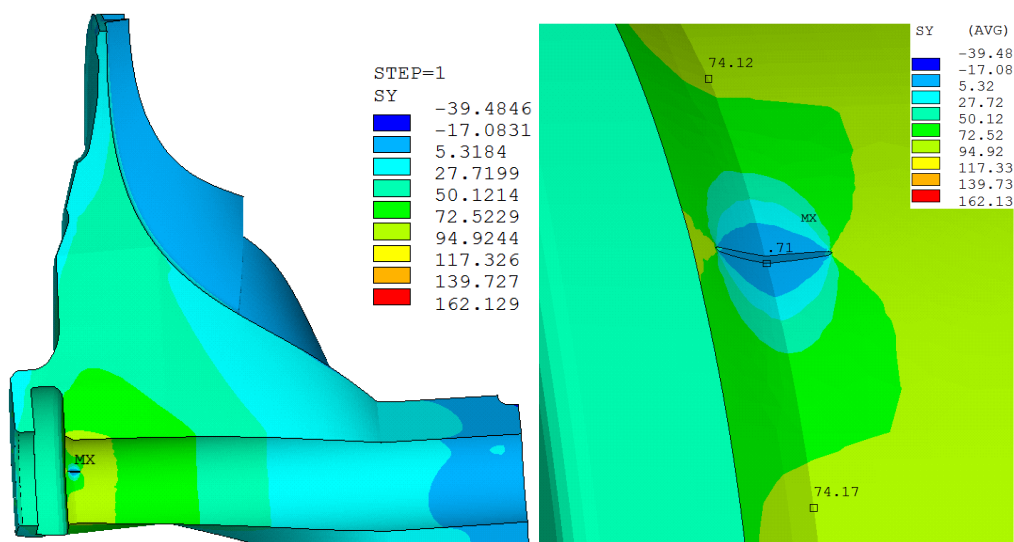


Рисунок 3 - Окружные напряжения ЦБК с трещиной на 1 шаге нагужения (рабочие условия)

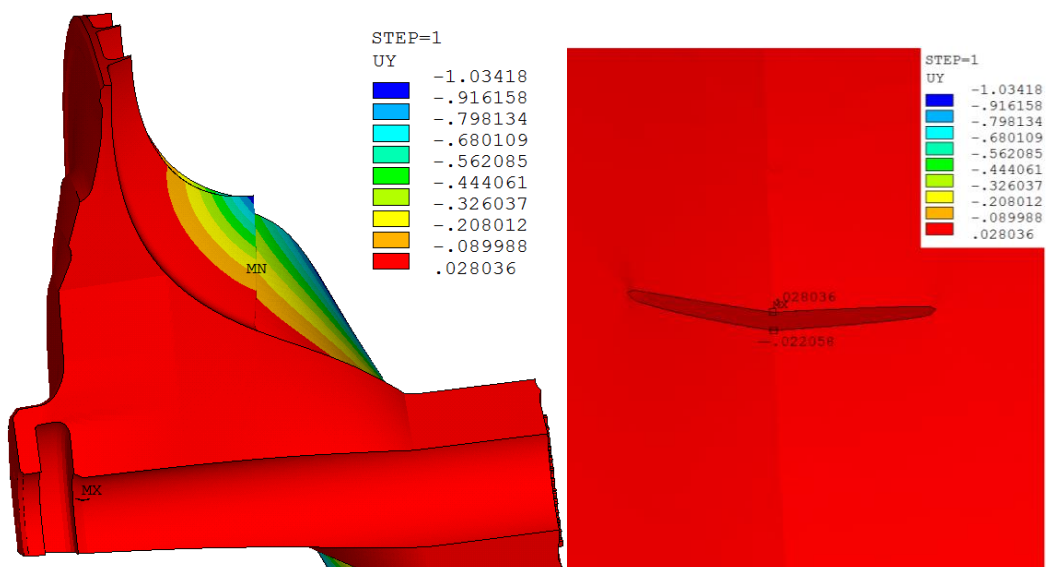


Рисунок 4 - Окружные перемещения ЦБК с трещиной на 1 шаге нагужения (рабочие условия)

На 2-ом шаге (разгрузка) на краях трещины в ступичной части ЦБК получены окружные напряжения, которые являются отрицательными величинами (см. рисунок 5). При этом, окружные перемещения, полученные на краях трещины в ступичной части

ЦБК на 2-ом шаге, суммарно составляют 4 мкм, что свидетельствует о неплотном закрытии трещины при разгрузке (см. рисунок 6).

Согласно ОСТ 1 90282-79 [2] комплект дефектоскопических материалов ЛЮМ1-ОВ позволяет выявлять поверхностные дефекты типа трещин с минимальной шириной раскрытия 0,12-0,5 мкм и протяженностью от 0,1 мм. Таким образом, выявление трещины в критической зоне ЦБК протяженностью 4 мм и шириной раскрытия 4 мкм при НК с применением капиллярного метода ЛЮМ1-ОВ является обычной операцией технологического контроля.

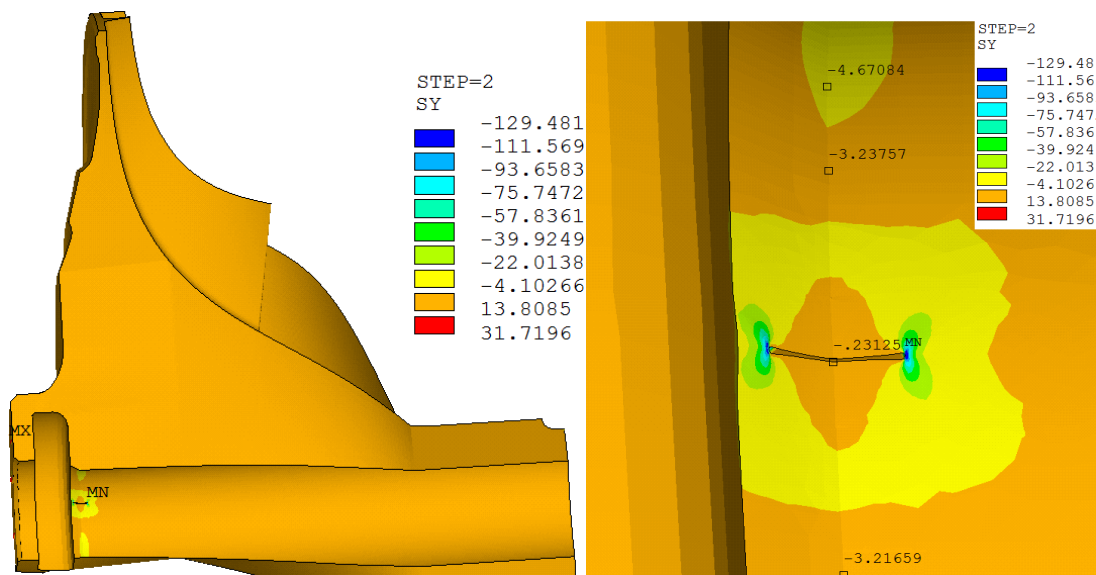


Рисунок 5 - Окружные напряжения ЦБК с трещиной на 2 шаге (разгрузка)

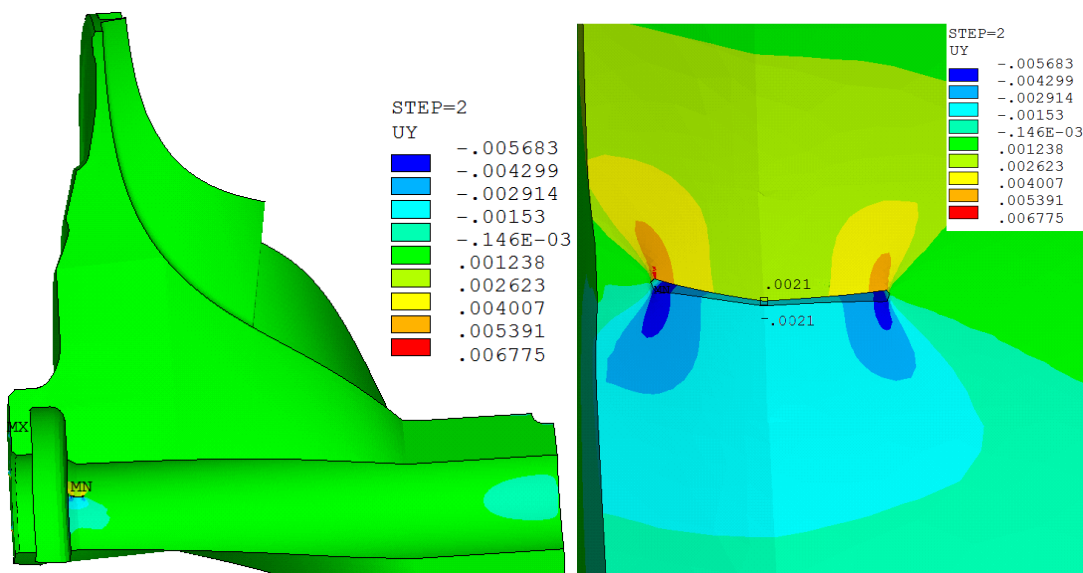


Рисунок 6 - Окружные перемещения ЦБК с трещиной на 2 шаге (разгрузка)

Для оценки влияния начального размера трещины на периодичность инспекций ЦБК выполнено несколько расчетов периода роста трещины в критической зоне ЦБК разной начальной длины.

График зависимости периода роста трещины в критической зоне и периодичности инспекций ЦБК от начального размера трещины приведен на рисунке 7.

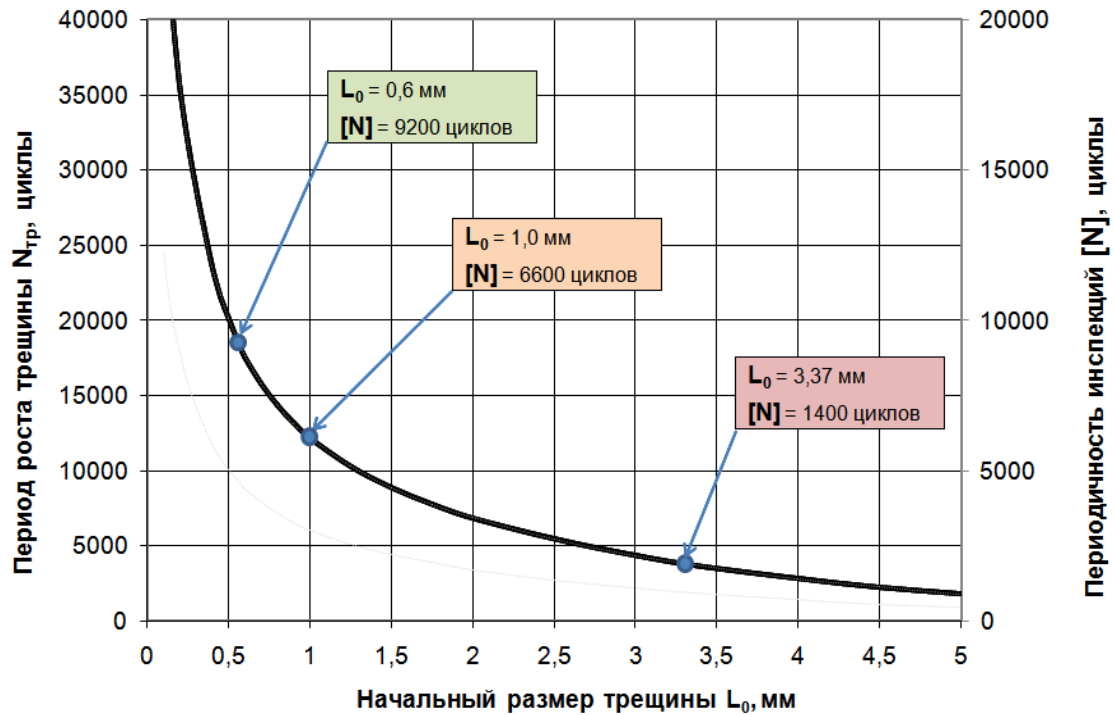


Рисунок 7 – Період росту тріщини та періодичність інспекцій ЦБК від початкового розміру тріщини

Как видно из рисунка 7, периодичность инспекций ЦБК для начального размера дефекта (трещины) 3,37 мм составляет 1400 циклов, а для размера 1 мм (предполагаемая эффективность метода ЛЮМ1-ОВ) – 6600 циклов. Таким образом, целесообразно провести работы по повышению эффективности выявляемости дефектов методом ЛЮМ1-ОВ.

### Литература

1. *Авиационный стандарт. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. ОСТ 1 01207–2012.*
2. *Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. ОСТ 1 90282-79.*

## **DEFECT CLASSIFICATION IN ACTIVE THERMAL TESTING WITH THE USE OF NEURAL NETWORKS**

*A. Momot*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Ukraine*

Thermal testing is widely used in various industries due to a number of advantages. The nature of differential temperature signal obtained from the results of active thermal non-destructive testing depends on many factors, including: measurement time, heating parameters, intensity of heat exchange of object of testing (OT) with the environment, OT thickness, thermophysical properties of OT, geometric dimensions, depth and other characteristics of defects, etc. All these factors are complicated in one another [1]. In practice, it is virtually impossible to establish clear class boundaries for the effective classification of defects by traditional mathematical or statistical methods.

Significant trend in the development of modern data processing systems is the use of artificial intelligence, in particular, neural networks (NN). Thanks to special training algorithms, neural networks are able to automatically detect complex hidden patterns in the relationships between input data. NN are capable for solving multi-parameter tasks and can effectively work with complex nonlinear dependencies, so they can be used as classifiers of images and means of constructing regression models [2].

The authors of [3] investigated the possibilities of using neural networks for testing products made of multilayered materials. Resulting binary map of defects was not inferior in quality to similar maps obtained by traditional methods. The benefits of using neural networks in this work are demonstrated at a qualitative level. Possibility of using neural network classifiers is noted and proved. In [4], a neural network is used to construct defect maps and classify defects by depth. Obtained results show that NN have greater efficiency compared to other methods. At the same time, there are no researches on effectiveness of NN in defining the type of defects, impact of network architecture, or the quality of training dataset on output.

At the present stage of development, there are many different types of neural networks used in a wide range of tasks. Choosing the type of NN is an important task, as each model of network is optimized for specific profile tasks. In thermal testing, the most investigated are classifiers based on multilayer backpropagation networks. Such models are the most versatile and used in both classification and regression tasks. It is known that this type of NN has the best approximating properties, which is why their layers are part of topologies of many other networks [5]. In thermal testing, feedforward networks can be used for both thermogram processing and defect classification and defectometry tasks.

During the training of neural network classifier, it is assumed that for each input vector there is a paired target vector that specifies the required output (response) of NN. Together, these vectors are called training pairs. The training dataset consists of a large number of such training pairs. In tasks of defect classification in thermal testing, temperature profiles of the OT sections are input vectors  $X_{in}[n]$ . Length  $n$  of input vector is the number of thermograms in sequence. The target vectors are  $Y_{target}[m]$ , which contain a binary code corresponding to the class number. Length  $m$  of target vector depends on the number of classes, which in turn is determined by number of possible types of defects.

Let's look at neural network classifier work on a computer simulation. A square-shaped CFRP plate with 100 mm side and 10 mm thickness is selected as object of testing. The plate contains artificial internal defects in the form of square air cavities and aluminum or paper inclusions of various sizes, depths and thicknesses. Schema of OT with internal hidden



defects is shown at fig. 1a. At this figure, air cavities are shown by white color, blue and red colors correspond to aluminum and paper inclusions respectively. The OT computer model is implemented in COMSOL Multiphysics software. Testing was carried out in a two-way scheme. A heat source with a power density of  $10 \text{ kW} / \text{m}^2$  is attached to the upper face of plate. Duration of the heating pulse is set to 1 s, simulation of OT cooling process took place over 14 s. The total duration of thermograms recording is 15 s. Sequence of 50 thermograms, that reflect the entire process of heating / cooling of OT, was obtained on simulation results. Thermogram at the optimal testing time is shown in fig. 1b. Obtained data were exported to MATLAB for further processing.

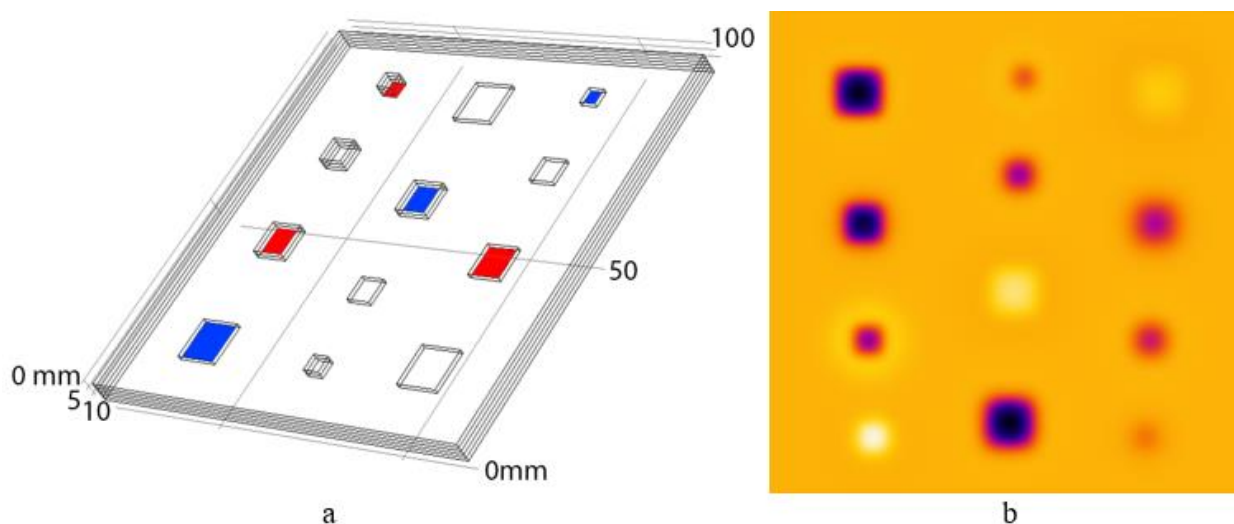


Fig. 1. Computer simulation: a – test specimen schema, b – optimal thermogram

Three additional computer models of similar sample plates were created for NN training. These models contained artificial defects of known sizes with different parameters. Each sample contained defects of one particular type: air cavities, aluminum inclusions, paper inclusions. Heating and cooling, as well as thermograms recording were done under similar to the test specimen conditions. Temperature profiles of the corresponding defects were used to form a set of training data.

Consider the work of a neural network to process a simulated thermograms sequence. To do this, a multilayer backpropagation neural network was built in MATLAB using an integrated Neural Network Toolbox module. The number of neurons in input layer corresponds to the number of thermograms in sequence and is  $i = 50$ . The number of neurons in hidden layer  $j = 10$ , the number of neurons in output layer  $o = 4$ . Hyperbolic tangent was used as activation function for neurons. Such a network structure has been empirically chosen since there is currently no single approach to selection of NN parameters for use in active thermal testing [6].

The number of output layer neuron, which have higher numerical meaning, corresponds to the number of defect class identified. The following class definitions were used:

- Class 1: defect-free area;
- Class 2: air cavity defect;
- Class 3: aluminum inclusion defect;
- Class 4: paper inclusion defect.

Obtained map of defects is shown in fig. 2. We can see insignificant shape changes for some defects. According to the results of work, neural network provided an error-free recognition of defects type. The value of relative error of defect area determination is 13.13%. Value of Tanimoto criterion, which is used in pattern recognition theory for determining

recognition quality, are obtained [7]. Value of Tanimoto criterion at 88% indicates high reliability of classification results.

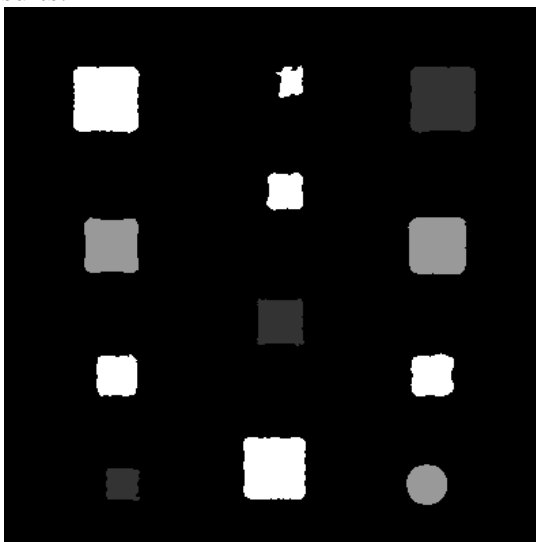


Fig. 2. Map of defects

As conclusion, the use of NN allows to automatically determine the technical condition of object, to build a map of defects and classify them by type or other parameters. NN generalizing capabilities make them an effective means of processing active thermal non-destructive testing data. Due to its high adaptability and versatility, it is promising to use NN in complex systems of thermal field analysis. Disadvantage of this approach is the need for a voluminous training database and the lack of a single approach to determining optimal architecture and network settings. The main direction for further research is optimization of the architecture and parameters of NN to determine the depth and thickness of defects.

### References

1. Galagan R. M. *Statistical analysis of thermal nondestructive testing data* / R.M. Galagan, A.S. Momot // *Advanced Information Systems*. – Kharkiv. – 2019. – Vol. 3.– № 1.– p.58-62.
2. Galagan R. M. *Analysis of methods for digital processing of thermograms* / R.M. Galagan, A.S. Momot // *Visnik Nacionalnogo Tehnichnogo Universitetu Ukrayini “KPI”. Seriya Priladobuduvannya*. – Kyiv. – 2018. – № 55(1). – p. 108-117.
3. Shirshova A. M. *Neural networks in active thermal nondestructive testing* / A. M. Shirshova // «Информационно-измерительная техника и технологии»: материалы III Научно-практической конференции, г. Томск, 3 – 5 мая 2012 г. – Томск, 2012. – С. 159-164.
4. Vavilov V. P. *Active thermal inspection of composite materials with the use of neural networks*/ V.P. Vavilov, D. A. Nesteruk // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2011. – Vol.2011. – pp. 655–662.
5. Gu J. et al. *Recent advances in convolutional neural networks* // *Pattern Recognition*. –2018. – vol.77. – pp. 354-377.
6. Halloua H. *An intelligent method using neural networks for depth detection by standard thermal contrast in active thermography* / H. Halloua, A. Elhassnaoui, A. Saïfi, A. Obbadi, Y. Errami, S. Sahnoun // *proc. 13th International Conference on Quantitative Infrared Thermography 2016, July 4-8, Gdansk, Poland (QIRT 2016)*. – Gdansk, Poland, 2016.– pp. 697–704.
7. López F. *Multivariate Infrared Signal Processing by Partial Least-Squares Thermography* / F. López, V. Nicolau, X. Maldague, C. Ibarra-Castanedo // *proc. VIIth IWASPND*. – Québec, Canada, 2013. – pp. 29–34.

## ПОБУДОВА БАГАТОПАРАМЕТРОВОЇ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МЕТАМОДЕЛІ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОБ’ЄМНОЇ СТРУКТУРИ

*Р.В. Трембовецька, В.Я. Гальченко, В.В. Тичков,  
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси*

Вихрострумний неруйнівний метод контролю знаходить широке використання в різноманітних галузях промисловості, оскільки має ряд суттєвих переваг. Разом з тим, до одного із недоліків відносять нерівномірну чутливість вихрострумного перетворювача, що зумовлена неоднорідним розподілом густини струмів Фуко в досліджуваному об’єкті контролю.

В ряді робіт авторами вирішена задача лінійного [1, 2] та нелінійного [2, 3] оптимального параметричного синтезу неспіввісних кругових вихрострумних перетворювачів плоскої структури з однорідною чутливістю в зоні контролю. Наведені в цих роботах приклади мають структуру збудження, що складається із  $M$  котушок радіусами  $r_k$  ( $k = 1 \dots M$ ), з рівномірним або нерівномірним їх розташуванням (рис. 1 а, б), які розташовані на однаковій висоті  $z_0$  над ОК.

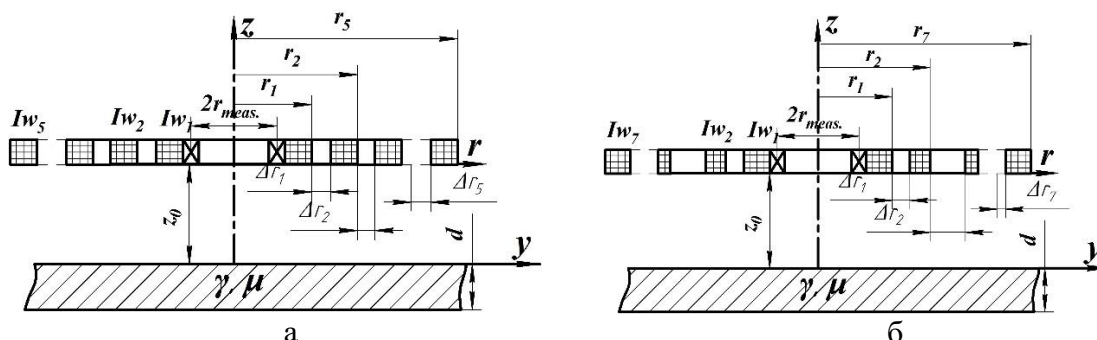


Рис. 1 – Розміщення котушок НВСП плоскої структури в системі збудження:  
а) рівномірне  $\Delta r = \text{const}$ ; б) нерівномірне  $\Delta r = \text{var}$ ;

Для цього була створена метамодель нерухомого перетворювача ( $v_x = 0$  м/с;  $v_y = 0$  м/с) для випадку варіювання трьох змінних  $J = f(x, y, r)$  із використанням RBF-нейронних мереж. Застосовані декілька методів підвищення точності нейромережевого рішення [1-3], зокрема архітектура RBF-мережі організована за допомогою комітетів та композитів мереж. Чисельні приклади проілюстрували прийнятну ефективність створених метамоделей, показана їх достатньо висока точність [4] та низька ресурсоемність, що дозволило реалізувати оптимальний сурогатний синтез перетворювачів.

Проте окремих досліджень потребують накладні вихрострумні перетворювачі (НВСП) об’ємної структури [5], за допомогою яких також забезпечується однорідна чутливість перетворювачів в зоні контролю.

**Мета роботи:** створення багатопараметрової RBF-метамоделі НВСП об’ємної структури при врахуванні зміни чотирьох параметрів  $\hat{J} = f(x, y, r, z_0)$ , яку можна в подальшому використовувати в задачі оптимального синтезу вихрострумних перетворювачів.

Розглядався модельний приклад побудови метамоделі рухомого НВСП у вигляді ампер-витків, що розташовані на різних висотах над ОК (рис. 2), при наступних вихідних даних: товщина струмопровідного матеріалу ОК  $d = 10$  мм; частота струму

збудження  $f = 5$  кГц; електрофізичні параметри матеріалу  $\sigma = 3,745 \cdot 10^7$  См/м,  $\mu_r = 1$ . Використовуючи математичну модель для рухомого НВСП [3, 5], виконано побудову метамоделі при варіюванні чотирьох параметрів в межах  $x = -45 \dots 45$  мм;  $y = 0 \dots 35$  мм;  $r = 2 \dots 15$  мм,  $z_0 = 2 \dots 5$  мм,  $\vec{v} = (40, 0, 0)$  м/с.

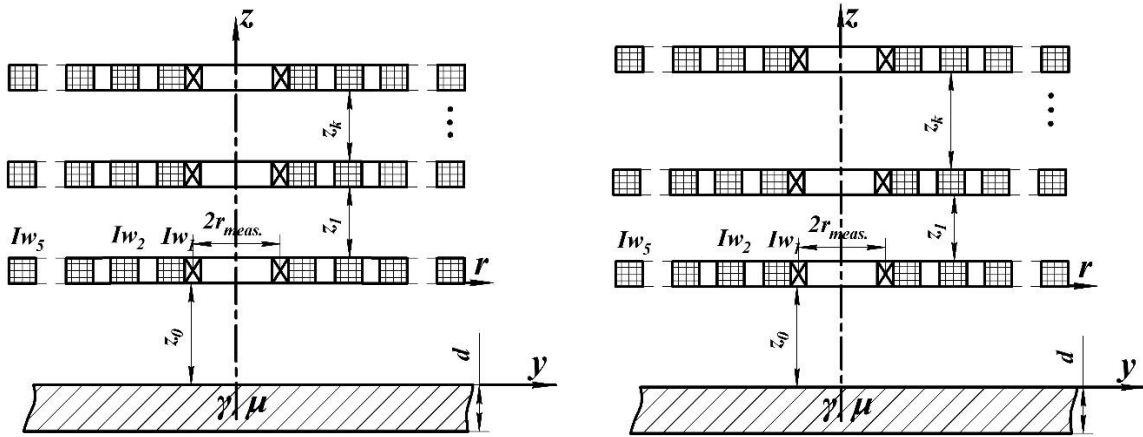


Рис. 2 – Розміщення котушок НВСП об’ємної структури в системі збудження:  
а) рівномірне  $\Delta r = \text{const}$ ,  $z_1 = z_k = \text{const}$ ; б) нерівномірне  $\Delta r = \text{const}$ ,  $z_1 \neq z_k$ ;

Для такого випадку при побудові метамоделі виникає ряд труднощів, наприклад, надзвичайно великий масив даних для процедури навчання та великий розмах значень щільності вихрових струмів для кожного радіусу і надскладна топографія поверхні відгуку (рис. 3).

Усунути деякі з цих складнощів вдається за рахунок декомпозиції простору пошуку як по висоті розташування перетворювача  $z$ , так і по радіусу  $r$ . Таким чином, в даному випадку в області пошуку виконано декомпозицію на три підобласті по висоті розташування перетворювача над ОК:  $I_z$  ( $2 \leq z \leq 3$  мм),  $II_z$  ( $3 < z \leq 4$  мм),  $III_z$  ( $4 < z \leq 5$  мм); по радіусу витків котушки  $I_r$  ( $2 \leq r \leq 3$  мм),  $II_r$  ( $3 < r \leq 5$  мм),  $III_r$  ( $5 < r \leq 8$  мм),  $IV_r$  ( $8 < r \leq 10$  мм),  $V_r$  ( $10 < r \leq 12$  мм),  $VI_r$  ( $12 < r \leq 15$  мм). За необхідністю виконувалося розбиття простору пошуку по радіусу ще на підобласті – безпосередньо під витками котушки та поза її межами. Для ілюстрації суттєво складної топографії поверхні відгуку на рис. 3 наведено лінії рівня поверхні відгуку для підобластей  $I_z$ - $V_r$ , яку необхідно апроксимувати за допомогою RBF-нейронної мережі. Надалі побудова метамоделі виконується за алгоритмом, що запропонований в роботах [1, 3, 4, 6].

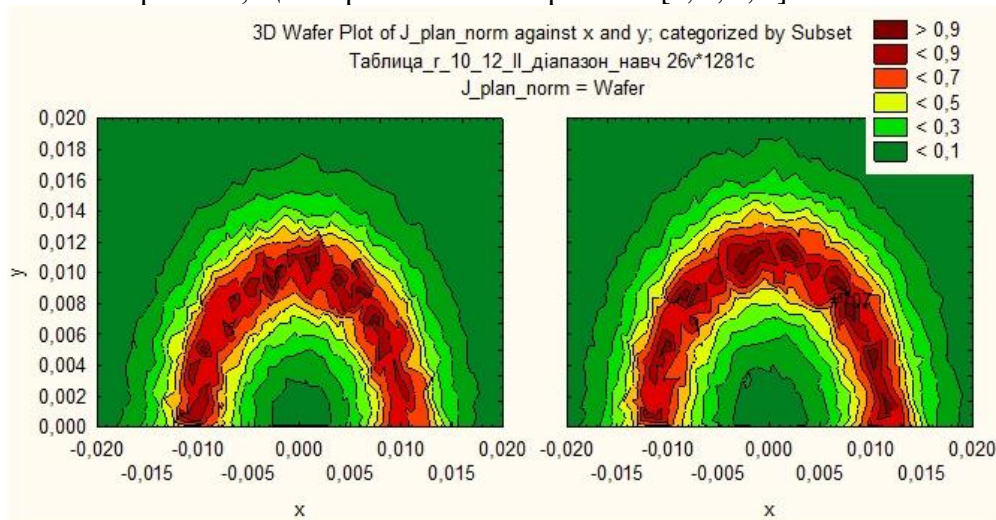


Рис.3 – Лінії рівня поверхні відгуку для піддіапазону  $I_z$ - $V_r$

В утворених підобластях для апроксимації побудовано групи RBF-нейронних мереж з планом чисельного експерименту, що має кількість точок  $N_{навч.}$ . Найкращі мережі відбиралися за показниками коефіцієнту детермінації  $R^2$ , середньої відносної величини модельної похибки  $MAPE, \%$ , суми квадратів залишків  $SS_R$ . Комітет мереж застосовувався на кожному каскаді композиту із мереж, що мають продуктивності навчальної, тестової та контрольної вибірки більше 90 %. Необхідна кількість каскадів визначається отриманим значенням  $MAPE, \%$  і припиняється їх нарощування, коли похибка при додаванні наступного каскаду зменшується до 1 %.

Верифікація метамоделі в цілому виконувалася перевіркою правильності відтворюваності поверхні відгуку у всіх підобластях як по висоті, так і по радіусу. Відновлення поверхні відгуку для рухомого НВСП отримано за допомогою гібриду «композит-комітет» нейромереж на точках, кількість яких значно більша ніж у навчальній вибірці  $N_{відтв.} > N_{нав.}$ .

Таким чином, створені метамоделі для всіх декомпозиційних підобластей мають задовільне значення  $MAPE, \%$  та мінімально можливе за даних умов значення суми квадратів залишків  $SS_R$ , що дозволяє використовувати їх при синтезі НВСП об’ємної структури.

### Література

1. Гальченко В. Я. *Линейный синтез несоосных накладных вихретоковых преобразователей [Текст]* / В. Я. Гальченко, Р. В. Трёмбовецкая, В. В. Тычков // *International Journal “NDT Days”*. – 2019. – Vol. 1. (в печати).
2. Трёмбовецька Р. В. *Оптимальний сурогатний параметричний синтез накладних кругових неспіввісних вихрострумів перетворювачів із рівномірною чутливістю в зоні контролю [Текст]* / Р. В. Трёмбовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тычков // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2019. – № 3. (друк).
3. Halchenko V. Ya. *Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes* / V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, A. V. Storchak // *Przegląd elektrotechniczny*. – 2019. - № 9. – P. 76-82. (in press).
4. Трёмбовецька Р. В. *Оцінка точності нейромережевих метамоделей кругових накладних вихрострумів перетворювачів [Текст]* / Р. В. Трёмбовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тычков, А. В. Сторчак // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2019. – № 2. (друк).
5. Halchenko V. Ya. *Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe* / V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov // *Electrical engineering & electromechanics*. - 2019. - № 2. - P. 28-38.
6. Гальченко В. Я. *Застосування нейрокомп’ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен [Текст]* / В. Я. Гальченко, Р. В. Трёмбовецька, В. В. Тычков // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2018. – № 74. – С. 60-72.

## **ТЕРМОГРАФІЧНА ДІАГНОСТИКА ЯК СУЧАСНИЙ ЗАСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПАТОЛОГІЙ ОРГАНІЗМУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ У МЕДИЦИНІ**

*О. В. Муравйов*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

У людському організмі внаслідок екзотермічних біохімічних процесів в клітинах та тканинах, а також за рахунок вивільнення енергії, пов'язаної з синтезом ДНК і РНК, виробляється велика кількість тепла, реєстрація картини розподілу якого та її аналіз дають змогу виявити різноманітні патологічні стани. Медичне теплобачення є безконтактним, швидким і неінвазивним методом діагностики багатьох відомих захворювань, що дозволяє спостерігати в динаміці та контролювати ефективність лікування, загоєння ран на різних стадіях морфогенезу, а також попередити можливий розвиток ускладнень. Використання термографа є високоефективним і інформативним засобом обстеження пацієнтів для виявлення запальних процесів, особливо на етапі відсутності специфічних клініко-лабораторних даних, що підтверджує його діагностичні можливості і доцільність використання на ранніх стадіях захворювання. Це відкриває широкі перспективи для застосування термографії в якості методу функціональної і скринінг-діагностики. Термограми, отримані за допомогою різних тепловізорів, є уніфікованими, відрізняються фактично лише розмірами та якістю зображення і можуть використовуватися одночасно для виявлення різних патологій. На сьогоднішній день розроблені критерії тепловізійної діагностики для сотень захворювань та патологічних станів і цей список постійно поповнюється [1].

Термографія з кожним днем отримує все більш широке застосування в багатопрофільних медичних установах. Робота лікаря-термографіста при скринінг-діагностиці проходить, як правило, в нестабільних умовах навколишнього середовища. Це обумовлює вимоги до наявності у нього високої кваліфікації і здатності враховувати вплив зовнішніх факторів, а також незавершену термоадаптацію пацієнтів в процесі діагностики. Тому одним з актуальних питань залишається підвищення інформативності та відповідності отриманих показників реальної температури ділянки поверхні об'єкта спостереження. Варто відзначити, що адекватність діагностики також залежить від правильності інтерпретації термограм, яка, в свою чергу, можлива тільки при отриманні чіткого зображення з високою якістю. Перераховані вище параметри в значній мірі залежать від умов експлуатації та впливу факторів навколишнього середовища на конструкцію термографа.

Відомо, що різні частини тіла людини мають індивідуальну нормальну середню температуру, зумовлену існуванням особливостей в ступені їх кровопостачання та іннервації, однак поверхнева температура симетричних ділянок окремих областей організму в нормі достовірно не відрізняється. Тому в якості контрольної ділянки для виявлення патологій слід використовувати протилежно симетричну область тіла.

При аналізі результатів отриманих термограм і постановці діагнозу існують певні правила і закономірності. Наприклад, зареєстрована різниця в 1-2 °С на протилежно симетричних ділянках тіла свідчить про наявність патології організму. Зокрема, при новоутвореннях зміна температури в більшу сторону вказує на злякисіне переродження, а в меншу - на доброякісну природу пухлини [2].

На сьогоднішній день термографічна діагностика застосовується в різних напрямках медицини: онкології, мамології, оториноларингології, кардіохірургії, при

судово-медичній експертизі [3]. Однією з найважливіших проблем при кардіохірургічних втручаннях є ішемічне пошкодження міокарда, оскільки через стискання аорти відсутня нормальна коронарна перфузія. Для повного контролю над температурним розподілом перспективним та інноваційним є використання термографів, що дозволяють отримати високоінформативне зображення температурного розподілу на всій поверхні серця.

Коливання температури на поверхні міокарда в досліджуваній області чітко визначаються при гіпотермії та гіпертермії в умовах штучного кровообігу. Точний контроль температури охолодження й нагрівання тканин мозку і серця дозволяє мінімізувати час проведення штучного кровообігу та забезпечити максимальний захист міокарда під час операції.

Зниження температури серця і мозку з  $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$  є головним фактором захисту від гіпоксичного ураження мозку при виключенні цих органів з кровообігу при операціях на відкритому серці. Під час зігрівання на початковому етапі температурна різниця між теплоносієм і тілом не повинна перевищувати  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На інших етапах зігрівання хворого до  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  температурний градієнт не повинен перевищувати  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура теплоносія повинна строго витримуватися в діапазоні  $39,0\text{--}39,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]. Отже, при операціях такого роду вкрай необхідний високоточний контроль температур як теплоносія, так і пацієнта.

У тепловізорах використовуються два діапазони довжин хвиль оптичного спектру, які відповідають вікнам прозорості атмосфери:  $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$  або  $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$ . Однак, для медичних термографів вибір спектрального діапазону роботи приладу не залежить виключно від вимог до прозорості атмосфери, оскільки об'єкт вимірювання (людина) знаходиться близько до камери і рівень поглинання інфрачервоного (ІЧ) випромінювання повітрям менш істотний. Разом з тим виявлено, що термографи, які працюють в спектральному діапазоні  $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ , більш чутливі до рефлексів засвічення шкіри від зовнішніх джерел теплових випромінювань. З огляду на те, що максимум спектральної інтенсивності випромінювання тіла людини з температурою  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  становить приблизно  $9,3\text{ }\mu\text{m}$  [4], а вплив паразитних фонів менш суттєвий в діапазоні  $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$ , при проектуванні фотоприймальних вузлів медичних тепловізорів варто орієнтуватися саме на цей спектральний діапазон.

Термооптичний аналіз однієї з типових схем ІЧ об'єктивів тепловізора [5] показав, що при підвищенні температури в оптичній системі з фокусною відстанню  $57,55\text{ mm}$  на  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (за умови однорідного температурного розподілу) зміна заднього фокального відрізка становить понад  $200\text{ }\mu\text{m}$ . Максимальна величина терморозфокусування спостерігається в об'єктивах, всі компоненти яких виготовлені з германію, що характеризується високим значенням термооптичної сталої. В результаті зміни величини заднього фокального відрізка, в площині фотоприймального пристрою діаметр плями розсіювання збільшується в 8 разів. Як наслідок, порушуються вимоги до контрасту зображення і концентрації енергії в розмірі пікселя. Контрастність зображення характеризується модуляційною передавальною функцією, значення якої на просторовій частоті Найквіста  $\mu\text{m}^{-1} = 20\text{ mm}^{-1}$  для матричного приймача випромінювання з розміром пікселя  $25 \times 25\text{ }\mu\text{m}$  на краю поля зору об'єктива зменшується на 40% для сагітальної і на 25% для меридіональної площин при зміні температури в ІЧ об'єктиві на  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вищевказані фактори обумовлюють різке зниження частотних і енергетичних характеристик оптичної системи і суттєве погіршення якості зображення тепловізора. Отже, температурна залежність характеристик матеріалів об'єктива суттєво впливає на якість одержуваного зображення, що, в свою чергу, знижує інформативність і адекватність оцінки патологічних станів по термограмі навіть при незначних змінах температурного поля в оптичній системі приладу.

У процесі синтезу діоптричних об'єктивів, що складаються з декількох компонентів, існує можливість підбору матеріалів з метою самоатермалізації системи.

При цьому є змога одночасно виконати ахроматизацію оптичної системи і мінімізувати ті аберації зображення, на які накладаються найбільш високі вимоги [6]. Для реалізації перерахованих вище завдань, а саме термостабілізації і підвищення характеристик об'єктива термографа, на етапі розрахунку конструктивних параметрів оптичної системи приладу доцільно застосовувати метод пасивної оптичної атермалізації [7]. Алгоритм методу передбачає використання при проектуванні об'єктива декількох ІЧ матеріалів з різними за величиною і знакам термооптичними сталими в поєднанні з певним матеріалом несучої конструкції вузла.

Синтезовані на основі методу пасивної оптичної атермалізації ІЧ об'єктиви з термостабілізованою величиною заднього фокального відрізка системи, такі як показаний у [8], зберігають стабільність частотних і енергетичних характеристик і мають високу якість зображення в діапазоні температур експлуатації приладу.

Сучасний рівень розвитку технології штучних нейронних мереж дозволяє повністю автоматизувати процес аналізу теплової картини і домогтися достовірності поставленого без участі лікаря діагнозу з вірогідністю до 95 відсотків. Для цього достатньо сформувати електронну базу з декількох тисяч термограм пацієнтів, оцінка яких призвела до ідентичних діагнозів у двох-трьох висококваліфікованих лікарів. Такої кількості даних більш ніж достатньо при використанні самонавчальної нейромережі для успішного подальшого функціонування.

Медична термографія сьогодні потребує вдосконалення алгоритмів роботи, модернізації техніки, автоматизації аналізу результатів діагностики із застосуванням передових технологій, а також проведення досліджень з розвитку самого методу, на що і повинні бути спрямовані подальші наукові зусилля.

### Література

1. *Иваницкий Г. Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине / Г. Р. Иваницкий // Успехи физических наук. – 2006. – №12. – С. 1294 – 1320.*
2. *Муравйов О.В. Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці / О.В. Муравйов, О.О. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2017. – вип. №1. – С. 124-131.*
3. *Заболотный Д. И. Новые возможности дистанционной инфракрасной термографии в оториноларингологии / Д. И. Заболотный, Л. Г. Розенфельд, Н. Н. Колотилов, Е. Ф. Венгер, А. Г. Коллюх, Д. Д. Заболотная, В. И. Дунаевский // Журн. вуш., нос. і горл. хвороб. – 2006. – № 5. – С. 2-5.*
4. *Муравьев А.В. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа / А.В. Муравьев, Е.А. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2016. – вип. №4. – С. 195-199.*
5. *Сокольский М. Н. Светосильный объектив для инфракрасной области спектра / М. Н. Сокольский, И. Е. Совз // Патент России № 2449327. – 2010.*
6. *Кучеренко О. К. Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем / О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2012. – вип. №43. – С. 46–53.*
7. *Муравьев А. В. Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа / А. В. Муравьев // TRENDS OF MODERN SCIENCE. – vol. 15. – 2018. – pp. 88-91.*
8. *Tyagur V. M. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat / V. M. Tyagur, O. K. Kucherenko and A. V. Murav'ev // Journal of Optical Technology. – vol. 81 (4). – 2014. – pp. 199-203.*



## СУЧАСНІ ПОРТАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

*О.В. Павлій*

*НВФ «Діагностичні прилади», м. Київ*

Радіаційний неруйнівний контроль – вид неруйнівного контролю, що в основі має реєстрацію та аналіз іонізуючого випромінювання (далі – ІВ), після взаємодії з об’єктом контролю. Радіаційне зображення – це зображення, сформоване ІВ після взаємодії з об’єктом контролю. Рентгенівський знімок являє собою розподіл щільності почорніння на рентгенівській плівці, який відповідає радіаційному зображенню контрольованого об’єкта. На рисунку 1 представлена узагальнена схема радіографічного контролю.

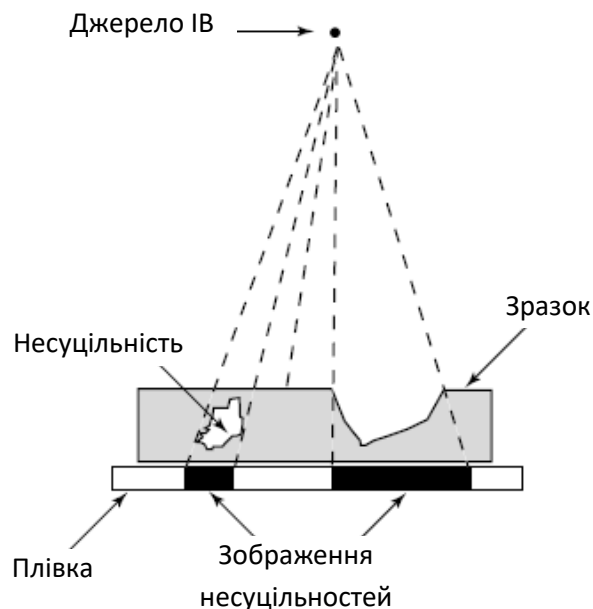


Рисунок 1 – Узагальнена схема радіографічного контролю

Сьогодні метод радіографії залишається (разом з акустичним методом) ключовим методом контролю виявлення внутрішніх дефектів найрізноманітніших матеріалів та виробів. Завдяки цілому комплексу переваг метод залишається головним методом контролю при будівництві та діагностиці різноманітних об’єктів, контролю якості відповідальних виробів. Так, наприклад, при будівництві магістральних трубопроводів обсяг контролю зварювання рентгенівським методом сягає 100% (і тільки в останні роки з’явилися документи, що дозволяють використання автоматизованих систем ультразвукового контролю). Беззаперечною перевагою методу є наявність «твердого документу» у вигляді рентгенівського знімку об’єкта контролю (далі – ОК), який може зберігатись протягом всього життя ОК (рис. 2).

Як і будь-який метод неруйнівного контролю, метод радіографії є методом порівняння з певним «еталоном дефекту», який має назву «індикатор якості зображення» і присутній на рентгенівському знімку для забезпечення заявленого рівня чутливості – здатності виявляти дефекти певного розміру (рис. 3).

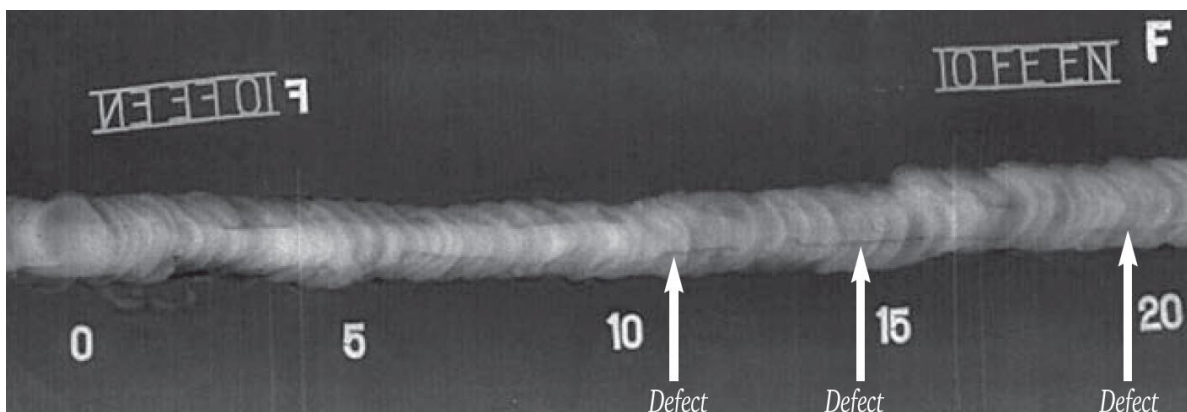


Рисунок 2 – Приклад рентгенівського знімку зварювального шва

Якість контролю залежить від багатьох факторів, один з найважливіших з них – здатність бачити еталон з параметрами, зазначеними у вимогах до якості виробу. Строго кажучи, якщо ми бачимо дрід діаметром 0.1 мм (W16) на рентгенівському знімку, то і дефект з таким же розміром ми теж повинні побачити.

IQI				Wire	Nominal Diameter
W1	W6	W10	W13	No.	mm
+				W 1	3.20
+				W 2	2.50
+				W 3	2.00
+				W 4	1.60
+				W 5	1.25
+	+			W 6	1.00
+	+			W 7	0.80
	+			W 8	0.63
	+			W 9	0.50
	+	+		W 10	0.40
	+	+		W 11	0.32
	+	+		W 12	0.25
		+	+	W 13	0.20
		+	+	W 14	0.16
		+	+	W 15	0.125
		+	+	W 16	0.100
			+	W 17	0.080
			+	W 18	0.063
			+	W 19	0.050




Рисунок 3 – Приклад індикатора якості зображення

Важливим є вибір джерела ІВ. Для неруйнівного контролю використовуються різноманітні джерела ІВ. Це можуть бути генератори рентгенівського випромінювання різної конструкції та з різними параметрами потужності, джерела У-випромінювання, прискорювачі електронів, тощо. Традиційно генератори рентгенівського випромінювання є найбільш розповсюдженими джерелами ІВ в неруйнівному контролі.

Розглянемо типову схему роботи генераторів рентгенівських променів. Коли швидкі електрони стикаються з деякими матеріалами, їх рух зупиняється, і частина енергії частки випромінюється у вигляді рентгенівських променів. Вакуумні трубки, в яких це явище використовується для створення рентгенівських променів, називають «рентгенівськими трубками». Схема рентгенівської трубки наведена на рис. 4.

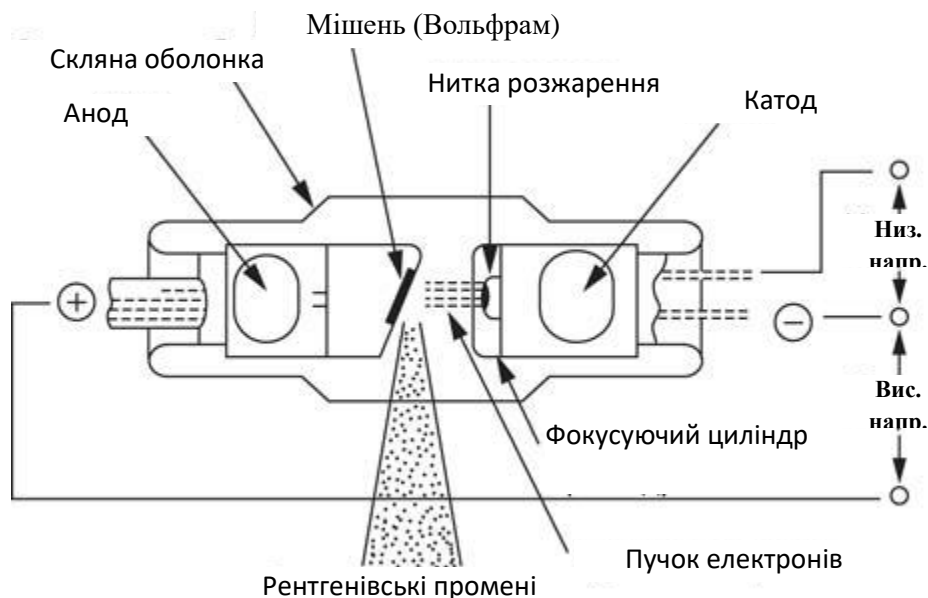


Рисунок 4 – Схема рентгенівської трубки

Коли між катодом і анодом пропускають постійний струм високої напруги, катод починає випускати електрони, які рухаються до анода і там, стикаючись з ним, породжують рентгенівське випромінювання. Напруга, що прикладається до двох електродів, називається напругою рентгенівської трубки, а поверхня анода, з якою стикаються електрони, називається мішенню.

Випромінювання електронів посилюється при нагріванні, тому в катод вбудовується нитка розжарення, схожа з вольфрамовою ниткою в звичайній лампі розжарювання. Для того, щоб спрямувати потік електронів, тобто сфокусувати його на мішені, використовується фокусуючий циліндр. При зіткненні електронів з анодом виділяється тепло, що призводить до підвищення температури анода. Оскільки мішень і інші вузли нагріваються до дуже високої температури, то її виготовляють з тугоплавкого вольфрама, що також полегшує генерування рентгеновського випромінювання. Кількість електронів, випромінюваних катодом, і, отже, дозу рентгенівського випромінювання, що створюється на анодній мішені, можна змінити, змінюючи напругу на нитці напруження рентгенівської трубки.

Коли напруга рентгенівської трубки змінюється, змінюється і швидкість, з якою електрони стикаються з мішенню, що викликає зміну характеру рентгенівського випромінювання (розподіл енергії по довжинах хвиль). Рентгенівські промені з відносно невеликою довжиною хвилі називаються жорстким випромінюванням, а з відносно великою – м'яким.

У генераторі рентгенівського випромінювання для зміни напруги використовують підвищуючий трансформатор і випрямляч. В результаті на рентгенівську трубку подається пульсуюча напруга. У рентгенівській зйомці ця пульсуюча напруга, що подається на рентгенівську трубку, виражається через пікове значення, і одиниця виміру позначається символом кВ. Напруга, що використовується для стимуляції випромінювання електронів вищеописаним способом, рідко перевищує 450 кВ через недостатню діелектричну міцність існуючих в даний час ізоляторів. Для подальшого прискорення електронів в генераторах рентгенівського випромінювання використовують резонансні трансформатори, електростатичні генератори, бетатрони або лінійні прискорювачі.

Конструкція рентгенівських генераторів, їх властивості є одним з визначальних факторів, що впливають на використання метода в польових умовах. Виробники направляють свої зусилля на зменшення фізичних розмірів при збереженні потужності

та можливості просвічувати відносно великі товщини виробів в польових умовах. Одним з ключових гравців ринку генераторів для дефектоскопії вже багато років є компанія «Teledyne-ICM» з Бельгії, що з 1993 року є досить успішним виробником та постачальником рентгенівських генераторів (рис. 5).

Існує декілька лінійок обладнання, що задовольняє більшість з існуючих потреб дефектоскопістів. Класична лінійка з направленою діаграмою розкриття пучка випромінювання – це апарати в діапазоні від 180 до 360 кВ напруги на аноді, та з вагою від 9 до 36 кг блока випромінювання.



Рисунок 5 – Рентгенівські генератори компанії «Teledyne-ICM»

Нижче приведена таблиця з технічними параметрами (табл. 1). Ключові параметри тут – напруга, струм на аноді, вага, габаритні розміри.

Для польових умов важливий фактор – розміри та вага, при умові збереження потужності генератора. Виробник пропонує нову лінійку генераторів серії SITEX CP, що вирізняється зменшеними габаритами та вагою (рис. 6).



Рисунок 6 – Рентгенівські генератори серії SITEX CP

Так, наприклад, генератор на 225 кВ має проникну властивість по сталі – до 47 мм (за стандартних умов), але важить не більш ніж 12.1 кг. Це досить революційне рішення для генераторів постійного випромінювання.

Таким чином, при використанні подібних генераторів в польових умовах, маємо можливість суттєво підвищити ефективність роботи та підвищити комфортність умов роботи дефектоскопіста.

Таблиця 1 – Технічні параметри рентгенівських генераторів компанії «Teledyne-ICM»

SITEX& XS DIRECTIONAL	UNITS	D1802	D2008	D2258	D2506
Output voltage range	kV	60 to 180	70 to 200	70 to 225	70 to 250
Output voltage selection step	kV	1	1	1	1
Tube current range	mA	1 to 3	1 to 8	1 to 8	1 to 6
Tube current range at full output	mA	2	8	8	6
Tube current selection step	mA	0.1	0.1	0.1	0.1
Radiation geometry	-	Directional	Directional	Directional	Directional
Maximum useful angle of X-ray beam	(°)	60x40	60x40	60x40	60x40
Dimension of optical focal spot	mm	0.8x0.8	2.5x2.5	2.5x2.5	2.5x2.5
Inherent filtration	mm	Equiv. 3.5 (Al)	2.5 (Al) + 0.4 (Ni)	2.5 (Al) + 0.4 (Ni)	2.5 (Al) + 0.4 (Ni)
Carousel of internal diaphragms with lead cap	-	no	yes (4+1)	yes (4+1)	yes (4+1)
Working cycle at 40°C ambient temp.	%	50*	100	100	100
Operating temperature range	°C	-25 to +70	-25 to +70	-25 to +70	-25 to +70
Storage temperature range	°C	-40 to +80	-40 to +80	-40 to +80	-40 to +80
SF6 insulation pressure at 20°C	kg/cm <sup>2</sup>	5.0	5.0	5.0	5.0
Cooling fans supply voltage	VDC	24	24	24	24
Weatherproof level	-	IP65	IP65	IP65	IP65
Penetration into steel at max power <i>(FFD=700mm/Film D7pb/D=1.5/T=20 min)</i>	mm Fe	24	41	49	54
Guard rings	-	yes	yes	yes	yes
Position of interconnection socket	choice	Radial	Axial/Radial	Axial/Radial	Axial/Radial
Number of telescopic centring device <i>(FFD=700mm)</i>	-	-	1	1	1
Max. leakage dose at 1m according to DIN at full output	mSv/h	2	2	10	10
Microcontroller HT measurement circuit <i>(kV and mA)</i>	-	yes	yes	yes	yes
Overall dimensions	mm	Ø250x573	Ø346x771	Ø346x771	Ø346x771
Total weight without guard rings	kg	9.5	28	28	28

Продовження таблиці 1

SITEX & XS DIRECTIONAL	UNITS	D3006	D3206	D3605	XS-D2004	XS-D2254	XS-D2504
Output voltage range	kV	90 to 300	90 to 320	120 to 360	70 to 200	70 to 225	70 to 250
Output voltage selection step	kV	1	1	1	1	1	1
Tube current range	mA	1 to 6	1 to 6	1 to 5	1 to 4	1 to 4	1 to 4
Tube current range at full output	mA	6	6	5	4	4	4
Tube current selection step	mA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Radiation geometry	-	Directional	Directional	Directional	Directional	Directional	Directional
Maximum useful angle of X-ray beam	(°)	60x40	60x40	60x40	60x40	60x40	60x40
Dimension of optical focal spot	mm	2.5x2.5	2.5x2.5	2.6x2.6	2.5x2.5	2.5x2.5	2.5x2.5
Inherent filtration	mm	2.5 (Al) + 0.4 (Ni)	2.5 (Al) + 0.4 (Ni)	2.5 (Al) + 0.4 (Ni)	0.4 (Ni)	0.4 (Ni)	0.4 (Ni)
Carousel of internal diaphragms with lead cap	-	yes (4+1)	yes (4+1)	yes (4+1)	yes	yes	yes
Working cycle at 40°C ambient temp.	%	100	100	60	100	100	100
Operating temperature range	°C	-25 to +70	-25 to +70	-25 to +70	-25 to +70	-25 to +70	-25 to +70
Storage temperature range	°C	-40 to +80	-40 to +80	-40 to +80	-40 to +80	-40 to +80	-40 to +80
SF6 insulation pressure at 20°C	kg/cm <sup>2</sup>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Cooling fans supply voltage	VDC	24	24	24	24	24	24
Weatherproof level	-	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65
Penetration into steel at max power <i>(FFD=700mm/Film D7pb/D=1.5/T=20 min)</i>	mm Fe	69	73	78	36	43	50
Guard rings	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Position of interconnection socket	choice	Axial/Radial	Axial/Radial	Axial/Radial	Axial/Radial	Axial/Radial	Axial/Radial
Number of telescopic centring device <i>(FFD=700mm)</i>	-	1	1	1	1 (laser)	1 (laser)	1 (laser)
Max. leakage dose at 1m according to DIN at full output	mSv/h	10	10	10	2	10	10
Microcontroller HT measurement circuit <i>(kV and mA)</i>	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Overall dimensions	mm	Ø346 x 831	Ø346 x 831	Ø400 x 930	Ø305 x 718	Ø305 x 718	Ø305 x 718
Total weight without guard rings	kg	31	31	46	19	19	19

Технічні параметри рентгенівських генераторів серії SITEX CP представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічні параметри рентгенівських генераторів серії SITEX CP

DIRECTIONAL	UNITS	CP160D	CP200D	CP225D	CP300D	CP320D
Output voltage range	kV	10 to 160	10 to 200	10 to 225	20 to 300	20 to 320
Output voltage selection step	kV	1	1	1	1	1
Tube current range	mA	1 to 10	1 to 10	1 to 10	1 to 10	1 to 10
Tube current at full output	mA	5.6	4.5	4	3.2	3
Tube current selection step	mA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Max. power at the anode	W	900	900	900	960	960
kV and mA stability	%	± < 0.5	± < 0.5	± < 0.5	± < 0.5	± < 0.5
Working cycle at 30°C ambient temperature (*)	%	100	100	100	100	100
Steel penetration at maximum kV and mA <i>(700mmFFD, 10 min, AA400, D=2)</i>	mm Fe	29	42	47	66	70
Total weight (excluding hand rings)	kg	11.9	12	12.1	23	23
Overall dimensions	mm	Ø 140 x 695	Ø 140 x 715	Ø 140 x 725	Ø 180 x 839	Ø 180 x 839
Leakage dose at 1m at full output	mSv/h	< 2.0	< 2.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0
Dimensions of optical focal spot according to EN12543	mm	3.0 (~1.5 IEC 336)	3.0 (~1.5 IEC 336)	3.0 (~1.5 IEC 336)	3.0 (~1.5 IEC 336)	3.0 (~1.5 IEC 336)
Radiation geometry	-	directional	directional	directional	directional	directional
Maximum useful angle	°	60 x 40 elliptical	60 x 40 elliptical	60 x 40 elliptical	60 x 40 elliptical	60 x 40 elliptical
Inherent filtration	mm Be	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Weatherproof level	-	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65
Operating temperature range	°C	-30 to +60	-30 to +60	-30 to +60	-30 to +60	-30 to +60
Storage temperature range	°C	-40 to +70	-40 to +70	-40 to +70	-40 to +70	-40 to +70

Продовження таблиці 2

Standard length of connecting cable	m	20	20	20	20	20
Maximum interconnecting cables extension	m	100 (5x20m)	100 (5x20m)	100 (5x20m)	100 (5x20m)	100 (5x20m)
Type of connector	-	MIL-DTL 26482 Metallic circular	MIL-DTL 26482 Metallic circular	MIL-DTL 26482 Metallic circular	MIL-DTL 26482 Metallic circular	MIL-DTL 26482 Metallic circular
Constant power mode	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Axial or radial positions switchable socket	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
SF6 insulation pressure at 20°C	bar	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
Cooling fan supply voltage	VDC	48	48	48	48	48
Line consumption @ 230VAC	A	6	6	6	6	6
Guard rings	-	2	2	2	2	2
Microcontroller HT measurement circuit (kV and mA)	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Fail-safe warning red light	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Real time clock for full automatic warm-up	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Built-in carousel featuring 2 diaphragms, shutter and laser pointer	-	Pb shutter, laser pointer, 0.8 mm Be window, 3 mm Alu filter, 10x48 cm diaphragm				

\* Open air - airstream 5m/s

### Література

1. Fujifilm Corporation. *Основы промышленной рентгеновской съемки. Технический справочник [Електронний ресурс] // IX-22-2009.02 F1079. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ntcexpert.ru/documents/IX-Film-Fundamentals-of-Industrial-Radiography.pdf>.*
2. TELEDYNE-ICM. *Portable X-Ray Generators for NDT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.teledyneicm.com/ndt/>.*
3. General Electric Company. *Industrial Radiography Image forming techniques [Електронний ресурс] // GEIT-30158EN (06/08). – 2006. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.industrial.ai/sites/g/files/cozyhq596/files/acquiadam\\_assets/industrial\\_radiography\\_image\\_forming\\_techniques\\_english\\_4.pdf](https://www.industrial.ai/sites/g/files/cozyhq596/files/acquiadam_assets/industrial_radiography_image_forming_techniques_english_4.pdf).*
4. NOVO DR. *IQI EN 462 reference manual [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.novo-dr.com/>.*
5. Назипов Р. А. *Основы радиационного неразрушающего контроля. Методическое пособие / Р. А. Назипов, А. С. Храмов, Л. Д. Зарипова. – Казань, 2008. – 66 с. – (Изд-во Казанск. гос. ун-та).*

## **ОКРЕМІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ ПРОГРАМ ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА»**

*О.В. Лашко, Навчальний центр з неруйнівного контролю “ДП-ТЕСТ”, м. Київ;  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ*

Неруйнівний контроль – розвинена галузь в усьому світі, від США – до Європи, Індії, Африки тощо, яка охоплює та обслуговує машинобудування та металообробку, енергетику, паливну промисловість та інші галузі. Методи неруйнівного контролю широко застосовуються для оцінки якості технічних об’єктів, визначення їх характеристик, дослідження їх структури тощо. Неруйнівний контроль (далі – НК) дає можливість оцінити якість об’єктів без руйнування їх цілісності або без порушення властивостей, які впливають на подальше використання за призначенням. Неруйнівні методи контролю широко застосовують на залізниці, для контролю елементів конструкції літальних апаратів, для відстеження стану мостів, канатних доріг, окремих вузлів машин та ін. Широке застосування неруйнівних методів пов’язане з можливістю їх застосування для перевірки якості продукції, подальше використання якої впливає на життя і безпеку людей. Підготовка фахівців у галузі неруйнівного контролю – відповідальний вид діяльності, до якого висуваються певні встановлені стандартизовані вимоги. Ці вимоги сформульовано як освітніми стандартами України, так і галузевою міжнародною та європейською нормативно-технічною документацією.

В Україні здобуття формальної освіти в галузі неруйнівного контролю на сьогодні передбачено через два типи організацій – освітні заклади (зклади вищої освіти, професійно-технічні навчальні заклади тощо) та учбові центри (NDT personnel training organizations). Проходження навчання у закладі освіти передбачає досягнення здобувачем освіти визначених стандартами освіти результатів навчання відповідного рівня освіти та здобуття кваліфікації, що підтверджується дипломом про освіту або іншого документу. В документі про освіту зазначаються вивчені здобувачем кредитні модулі, їх тривалість та результати атестацій. Навчання неруйнівному контролю у закладах вищої (далі – ЗВО) освіти проводиться за затвердженими освітніми (навчальними) програмами. Вимоги до навчальних програм визначаються вимогами стандартів освіти, виходячи з визначених цілей навчання та компетентностей випускника [1], [2] та ін. Результати навчання описуються складною системою компетентностей, якими повинен володіти випускник, серед яких – практичні навички виконання операцій контролю.

Навчання неруйнівному контролю в учбових центрах, як правило, носить характер підготовки кандидатів до сертифікації на відповідні кваліфікаційні рівні, з відповідних методів НК, у відповідних секторах продукції та промислових секторах, яка в Україні та світі є підтвердженням кваліфікації фахівця. Вимоги до процесу підготовки до сертифікації регламентуються європейськими, міжнародними та іншими нормативними документами [3], [4], [5], а також системами менеджменту якості навчальних центрів відповідно до стандарту ДСТУ ISO 9001 «Системи управління якістю. Вимоги». Після проходження підготовки у навчальному центрі кандидату видається документ, що підтверджує успішне проходження курсів навчання, який, як правило, містить інформацію про назву курсу (відповідно до методів НК), його тривалість, зазначення галузі навчання та ін. Вимоги до програм підготовки до сертифікації у галузі неруйнівного контролю регламентуються міжнародними і регіональними нормативними документами, серед яких найбільш широко



застосовується стандарт ISO/TR 25107 «Non-destructive testing – NDT training syllabuses» [6]. Результати навчання кандидатів оцінюються в процесі атестації, що включає в себе екзамени: теоретичний (перевірка теоретичних знань з методів), спеціальний (перевірка знання нормативної документації) та практичний (вміння проводити операції контролю та звітувати про його результати).

Як показує практичний досвід, більшість випускників ЗВО, що здобули вищу освіту в галузі неруйнівного контролю та працюють за фахом, додатково проходять сертифікацію на відповідні кваліфікаційні рівні з окремих груп методів НК. Така траєкторія професійного розвитку фахівців з НК склалася протягом останніх десятиліть та на сьогодні виправдовує себе. Таким чином, дедалі очевиднішою стає потреба в гармонізації навчальних програм ЗВО, які здійснюють підготовку фахівців в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики, з програмами підготовки до сертифікації з НК.

Рішенням означеної проблеми може стати врахування освітніми закладами при розробці навчальних програм положень стандартів, які визначають вимоги до програм спеціальної підготовки, наприклад, зазначеного вище стандарту ISO/TR 25107. Інтеграція положень стандарту ISO/TR 25107 до навчальних програм з дисциплін дасть можливість, по-перше, наблизити результати навчання з НК у ЗВО до актуальних вимог роботодавців; по-друге, значно спростити для випускників процес підготовки до сертифікації з методів, яка, як правило, є невід’ємною частиною професійного розвитку.



Рисунок 1 - Схема організації формального навчання неруйнівному контролю

Міжнародний стандарт ISO/TR 25107 «Non-destructive testing – NDT training syllabuses» містить рекомендації щодо змісту програм та обсягів підготовки кандидатів у фахівці з неруйнівного контролю з метою подальшої сертифікації на 1-ий, 2-ий та 3-ій кваліфікаційні рівні з радіографічного (RT), ультразвукового (UT), вихрострумowego (ET), капілярного (PT), магнітопорошкового (MT), візуального (VT) контролю, інфрачервоної термографії (TT), течешукання (LT), контролю методом акустичної емісії (AT) та тензометричним методом (ST), дифракційно-часовим методом (UT-TOFD) та контролю з використанням фазованих решіток (UT-PA) – у відповідності до

стандарту ДСТУ EN ISO 9712 "Неруйнівний контроль – Кваліфікація і сертифікація персоналу з неруйнівного контролю". Документ містить перелік тем і питань, які рекомендовано для вивчення під час проходження кандидатами курсів підготовки, а також рекомендації стосовно тривалості вивчення тих чи інших тем – в залежності від рівня кваліфікації, на який претендує кандидат. Крім того, в стандарті зазначено посилання на основні нормативні документи у галузі неруйнівного контролю, рекомендовані до вивчення. Для кожної групи методів стандартом передбачено загальну структуру курсу з їх вивчення із зазначенням питань, що повинні бути розглянуті. Ця структура включає в себе десять основних положень, які у довільному перекладі з англійської можна сформулювати наступним чином [6, с. 9-102]:

- 1) **Вступ до термінології та історії методів:** для кожної групи методів передбачено короткий огляд основних завдань контролю, термінів та історичних відомостей. В цьому розділі також передбачено короткий огляд ключових стандартів для групи методів, яка вивчається. Для вивчення термінології доцільно використовувати стандарти серії EN 1330 та подібні їм, які включають в себе загальну термінологію неруйнівного контролю та термінологію окремих груп методів.
- 2) **Фізичні основи методів та асоційовані знання:** розділ включає в себе питання щодо математичних та фізичних основ певної групи методів, основних фізичних явищ та процесів, на яких вони базуються, та супутньої теоретичної інформації.
- 3) **Знання продукції, що контролюється, пов'язані з цим можливістю контролю та похідні способи контролю:** питання цього розділу спираються на галузь сертифікації, а саме – сектори за типом продукції (литво (c), поковки (f), зварні вироби (w), труби і трубопроводи (t), прокат (wp)), а також – промислові сектори. Вивчення даного розділу програми передбачає огляд основних стандартів у галузі НК за типом продукції, методами НК, способами контролю тощо. В цьому ж розділі рекомендується проводити аналіз можливих дефектів продукції та причин їх виникнення.
- 4) **Обладнання:** розділ включає питання, що стосуються обладнання та зразки (стандартні, калібрувальні та ін.), які використовуються для певної групи методів НК. Розглядаються питання метрологічного забезпечення контролю, якщо це доцільно.
- 5) **Інформація, яку необхідно знати перед тим, як приступити до проведення контролю:** розділ включає питання стосовно підготовки до проведення контролю – визначення матеріалу та врахування геометрії і стану поверхні об'єкта контролю, визначення умов проведення контролю, визначення технік і послідовності операцій, – а також підготовку письмових процедур та інструкцій.
- 6) **Проведення контролю:** практичне виконання процедур контролю вибраними методами і техніками.
- 7) **Аналіз результатів та звітування:** розглядаються питання інтерпретації результатів контролю (виявлення дефектів, визначення їх розташування, геометричних розмірів тощо) та складання протоколу контролю.
- 8) **Оцінка:** питання оцінки відповідності об'єкта контролю вимогам, встановленим нормативною документацією (рівні приймання).
- 9) **Аспекти якості:** розглядаються питання стосовно вимог до персоналу з неруйнівного контролю у відповідності до ДСТУ EN ISO 9712 "Неруйнівний контроль – Кваліфікація і сертифікація персоналу з неруйнівного контролю" та інших систем сертифікації. Також розділ включає в себе питання верифікації обладнання та простежуваності документів.
- 10) **Розробки:** мета вивчення даного розділу – ознайомити кандидата з новітніми промисловими та науковими розробками певної групи методів НК.

Додатково, відповідно до ISO/TR 25107, програми з капілярного та магнітопорошкового контролю повинні містити розділ «Екологічні умови та умови безпеки», що пов'язано з використанням для цих груп методів хімічно активних речовин, які можуть бути небезпечними для здоров'я людини та довкілля. Питання радіаційної безпеки, відповідно до [3] та [6], до програм підготовки фахівців з НК не входять і вивчаються окремо. Проте, рекомендується включати окремим розділом вимоги радіаційної безпеки до програм підготовки здобувачів вищої освіти. Детальний перелік питань до кожного розділу для окремих груп методів НК представлений у зазначеному стандарті [6].

У таблиці 1 наведено перелік шифрів міжнародної (ISO) та європейської (EN) нормативної документації, рекомендованої для включення до програм навчання неруйнівного контролю у закладах вищої освіти. Даний перелік складено на підставі рекомендацій стандарту ISO/TR 25107 з урахуванням досвіду його практичного застосування в процесі підготовки кандидатів до сертифікації.

Таблиця 1 – Перелік шифрів міжнародної та європейської нормативної документації, рекомендованої для включення до програм навчання

Розділи	Шифри нормативних документів
Загальні питання НК	EN ISO 9712, EN 4179, ISO 3999, ISO 5579, ISO 5580, ISO 10675-1, ISO 10675-2, ISO 11699-1, ISO 11699-2, ISO 14096-1, ISO 14096-2, ISO 15708-1, ISO 15708-2, ISO 16371-1, ISO 16526-1, ISO 16526-2, ISO 16526-3, ISO 17635, ISO 17636-1, ISO 17636-2, ISO 19232-1, ISO 19232-2, ISO 19232-3, ISO 19232-4, ISO 19232-5, EN 12543-1, EN 12543-2, EN 12543-3, EN 12543-4, EN 12543-5, EN 12679, EN 12681, EN 13068-1, EN 13068-2, EN 13068-3, EN CR 13935, EN 16016-1, EN 16016-2, EN 16016-3, EN 16016-4, EN 13445-5, EN 13480-5
UT	EN 1330-4, ISO 16809, ISO 16810, ISO 16811, ISO 17640, EN ISO 16827, EN 12680-1, EN 10228-3, EN 10228-4, EN ISO 17635, ISO 17640, ISO 23279, ISO 16823, ISO 16826, ISO 16828, EN ISO 13588, EN ISO 22825, EN ISO 10863, EN ISO 11666, ISO 25902, EN 10308, EN 4050, EN 10307, EN 16729, EN 14127, EN ISO 16831, EN 17635, CEN/TR 15135, EN 12668-1, EN 12668-2, EN 12668-3, ISO 10375, EN ISO 15626, EN ISO 18563-1, EN ISO 18563-2, ISO 18563-3, EN 15317, EN ISO 7963, EN ISO 2400, EN 10160, ISO 18175
RT	EN 12543-1, EN 12543-2, EN 12543-2, EN 12543-3, EN 12543-3, EN 12543-4, EN 12543-4, EN 12543-5, EN 12543-5, EN 12679, EN 12681, EN 12681-1, EN 12681-2, EN 13068-1, EN 13068-2, EN 13068-3, EN 13100-2, EN 16016-1, EN 16016-2, EN 16016-3, EN 16016-4, EN 16407-1, EN 16407-2, EN ISO 10893-6, EN ISO 10893-7, EN ISO 17636-1, EN ISO 17636-2, EN ISO 5579, ISO 10675-1, ISO 11699-1, ISO 11699-2, ISO 12721, ISO 14096-1, ISO 14096-2, 15708-1, ISO 15708-2, ISO 16371-1, ISO 16371-2, ISO 16526-1, ISO 16526-2, ISO 16526-3, ISO 17635, ISO 17636-1, ISO 17636-2, ISO 19232-1, ISO 19232-2, ISO 19232-3, ISO 19232-4, ISO 19232-5, ISO 3999, ISO 4993, ISO 5579, ISO 5580, EN 17635, CEN/TR 15135
ET	EN 1330-5, EN 10246-3, EN 12084, EN 13860-1, EN 13860-2, EN ISO 10893-2, EN ISO 12718, ISO 15549, ISO 15548-1, ISO 15548-2, ISO 15548-3, ISO 17643, EN 17635, CEN/TR 15135

PT	EN ISO 12706, EN ISO 3452-1, EN ISO 3452-2, EN ISO 3452-3, EN ISO 3452-4, EN ISO 3452-5, EN ISO 3452-6, EN 1371-1, EN 1371-2, EN ISO 3059, EN 10228-2, ISO 4987, EN ISO 10893-4, EN ISO 23277, ISO 3058, EN 17635, CEN/TR 15135
MT	EN ISO 12707, EN ISO 9934-1, EN ISO 9934-2, EN ISO 9934-3, EN ISO 3059, EN ISO 17638, EN ISO 23278, EN 10228-1, ISO 4986, EN ISO 10893-5, EN ISO 10893-1, EN 1369, ISO 3058, ISO 11960, EN 17635, CEN/TR 15135
VT	EN 1330-10, ISO 6520-1, ISO 5817, EN 13018, EN ISO 17637, EN 1370, ISO 11971, EN 13927, ISO 3057, ISO 3058, ISO 8785, EN 10163-1, EN 10163-2, EN 10163-3, EN 17635, CEN/TR 15135

Таким чином, вирішенням проблеми неузгодженості програм підготовки фахівців з неруйнівного контролю у ЗВО та програм підготовки кандидатів до сертифікації з НК може стати часткове або повне провадження положень стандарту ISO/TR 25107 «Non-destructive testing – NDT training syllabuses». Врахування положень ISO/TR 25107 як документу, який, разом із стандартом освіти, встановлює вимоги до змісту освітніх програм при підготовці фахівців у галузі неруйнівного контролю і технічної діагностики, дозволить наблизити результати навчання неруйнівному контролю у закладах вищої освіти до вимог потенційних роботодавців та розширити перспективи професійного становлення випускників в процесі працевлаштування за фахом.

Деякі інші аспекти підготовки фахівців у галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики розглядаються у [7], [8] та ін.

«Неруйнівний контроль робить важливий внесок у безпеку, економічний та екологічний добробут нашого суспільства» [6, с. 5].

### Література

1. Стандарт вищої освіти України за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України // Київ. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-zatverdzhennya-standartu-vishoyi-osviti-za-specialnistyu-151-avtomatizaciya-ta-kompyuterno-integrovani-tehnologiyi-dlya-pershogo-bakalavrskogo-rivnya-vishoyi-osviti>.

2. Стандарт вищої освіти України за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України // Київ. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-zatverdzhennya-standartu-vishoyi-osviti-za-specialnistyu-152-metrologiya-ta-informacijno-vimiryvalna-tehnika-dlya-pershogo-bakalavrskogo-rivnya-vishoyi-osviti>.

3. ДСТУ EN ISO 9712:2014 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю». // 2016. – 43 с.

4. ДСТУ EN 4179:2017 «Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю». // 2017. – 31 с.

5. SNT-TC-1A «Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing» // The American Society for Nondestructive Testing. – 2011. – 40 p.

6. *ISO/TR 25107:2018 «Non-destructive testing – NDT training syllabuses» // Published in Switzerland. – 2018. – 108 p.*

7. *Лашко О.В. Психолого-педагогічний супровід майбутніх фахівців з неруйнівного контролю в процесі професійної підготовки у вищому навчальному закладі / О.В. Лашко // 8-ма міжнародна н/т конф. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання, 14-16 листопада 2017. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 70-72.*

8. *Лашко О.В. Застосування сучасних методів психолого-педагогічного супроводу в організації навчальних занять для майбутніх інженерів з приладів і систем контролю та діагностики / О.В. Лашко // Матеріали 2-гої науково-технічної конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2018». – Люблін, Польща: УТ НКТД, 2018. – №2 – С. 27–29.*

## ВПЛИВ ВИБОРУ ЧАСУ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА РЕЗУЛЬТАТИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЯ

*Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко, О.Л. Дугін*  
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний*  
*інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

**Вступ.** Прискорені темпи розвитку інформаційно-вимірювальних технологій і методів цифрової обробки сигналів створюють умови для удосконалення методів і засобів обробки інформаційних сигналів неруйнівного контролю. Ця загальна тенденція має місце і в вихрострумівому контролі (ВСК). До кола ключових завдань останнього відносяться підвищення інформативності та реалізація режиму багатопараметрового контролю [1, 2]. Один з актуальних методів вирішення цих завдань пов'язаний з використанням імпульсного режиму збудження вихрових струмів [3, 4]. Його суть полягає у впливі через вихрострумівий перетворювач (ВСП) імпульсним сигналом на об'єкт контролю (ОК), формуванні реакції системи ВСП - ОК у вигляді зазату гармонічного коливання і подальшому оцінюванні параметрів ОК та характеристик його матеріалу за такими інформативними параметрами сигналу ВСП, як декремент коливального сигналу та частота власних коливань. Застосування методу обробки сигналу ВСП на основі дискретного перетворення Гільберта дає змогу отримувати амплітудні і фазові характеристики цього сигналу (АХС і ФХС), що істотно спрощує подальше оцінювання їх інформативних параметрів. Процес оцінювання параметрів сигналів ВСП через особливості обчислювальних ефектів, а також дії шумів і завад різної природи супроводжується виникненням похибки. Методична складова похибки визначається особливостями використаних цифрових методів обробки сигналів та режимів отримання даних [5].

**Мета і завдання дослідження.** В роботі [6] розглянуто можливість підвищення точності визначення декремента сигналів ВСК, які виникають як реакція на імпульсне збудження вихрових струмів, у вигляді загасаючих гармонічних коливань за рахунок вибору оптимального інтервалу часу аналізу цього сигналу. Однак повний аналіз впливу цього фактору не проведено. Метою роботи є дослідження впливу часу аналізу сигналу імпульсного ВСК у вигляді загасаючого гармонічного коливання на похибку визначення декремента цього сигналу.

Для зазначеної задачі модель сигналу ВСП в загальному вигляді може бути представлена адитивною сумішшю згасаючих гармонічних коливань і гаусового шуму:

$$u_{\text{всп}}(t) = Ue^{-\alpha t} \cos(2\pi ft) + u_{\text{ш}}(t), t \in (t_1, t_2) \quad (1)$$

де  $U$  – амплітудне значення сигналу ВСП,  $\alpha$  – декремент сигналу,  $f$  – частота власних коливань,  $t$  – поточний час,  $(t_1, t_2)$  – інтервал часу аналізу сигналу ВСП,  $u_{\text{ш}}(t)$  – шумова складова сигналу, яка розглядалась як реалізація гаусового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією  $\sigma^2$ .

Необхідно визначити декремент  $\alpha$  сигналу ВСП з використанням методів регресійного аналізу, а також визначити точність його оцінювання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- 1) застосувати нелінійний регресійний аналіз до задачі оцінювання АХС ВСП і довірчого інтервалу її значень;
- 2) визначити декремент сигналу ВСП з урахуванням оптимального часу аналізу цього сигналу;

3) оцінити похибку визначення декременту сигналу ВСП з урахуванням застосування методів регресійного аналізу та оптимального часу аналізу сигналів ВСП.

**Методика вирішення поставленого завдання.** Поставлена задача вирішувалася методом моделювання. Для цього було сформовано сигнал виду (1) з наступними параметрами:  $A = 1\text{В}$ ,  $f = 500\text{кГц}$ ,  $\alpha = 3 \cdot 10^5\text{с}^{-1}$ . Час дискретизації обраний рівним  $T_d = 20 \cdot 10^{-9}\text{с}$ . В якості завади був використаний гаусовий шум. На часовому інтервалі аналізу співвідношення сигнал / шум ( $A/\sigma$ ) змінювалося в діапазоні від 1% до 10%. Фрагмент змодельованого сигналу ВСП наведено на рис. 1 (крива 1).

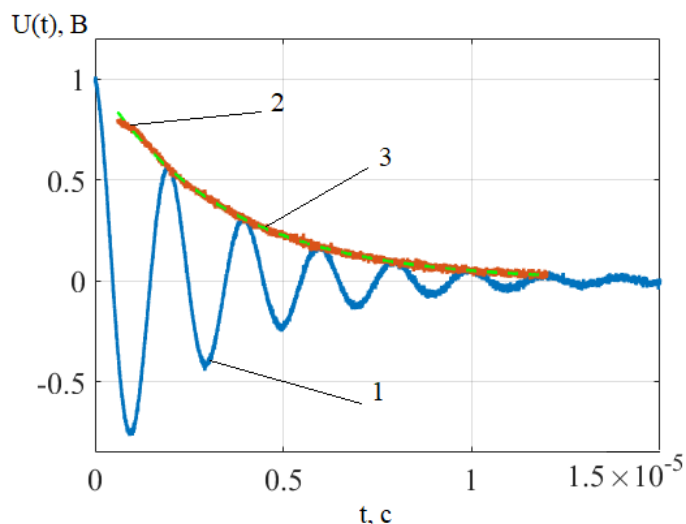


Рис. 1. Фрагмент сигналу ВСП і його амплітудної характеристики: 1 - сигнал ВСП, 2 та 3 - амплітудна характеристика сигналу і її тренд відповідно

**Алгоритм обробки сигналів перетворювача.** Порядок обробки інформаційних сигналів ВСП з імпульсним збудженням передбачав (рис. 2) формування вибірки сигналу  $u_{\text{всп}}[j]$  і використання дискретного перетворення Гільберта для отримання Гільберт-образу і обвідної цього сигналу:

$$u_H[j] = \mathbf{H}[u_{\text{всп}}[j]], \quad (2)$$

$$A[j] = \sqrt{u_{\text{всп}}^2[j] + u_H^2[j]}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{H}$  – оператор дискретного перетворення Гільберта;  $A[j]$  – дискретна АХС.

З метою усунення впливу шумів на АХС було розглянуто використання методів нелінійного регресійного аналізу. Беручи до уваги нелінійність АХС, і можливість її представлення експоненційною функцією виду  $ke^{\alpha t}$ , завдання визначення лінії регресії зводилося до визначення лінійної регресії логарифмічної функції від АХС, тобто до визначення лінійної регресії функції виду [7]:

$$\ln(A[j]) = \ln(ke^{\alpha j T_d}) = \ln(k) + \alpha j T_d. \quad (4)$$

Провівши заміну і позначивши  $\ln(k) = b$ , рівняння (4) зводиться до лінійної функції  $y(t) = \alpha t + b$ , де поточний час  $t = t_j = j T_d$ .

Для визначення лінійної регресії був обраний метод Бартлетта-Кену. Даний метод відносно простий і може використовуватися для аналізу невеликих за обсягом вибірок. В основі методу лежить упорядкування даних за часом  $t$  і поділ корисної частини вибірки  $A[j]$ ,  $j = 50 \dots 600$ , на три групи однакового обсягу  $M$ . У кожній групі обчислюються суми виду  $\sum A[j]$  і  $\sum t_j$ . Позначимо їх відповідно  $A_1, A_2, A_3$  і  $t_1, t_2, t_3$ .

Тоді коефіцієнти лінійної регресії оцінюються співвідношеннями:

$$\alpha = \frac{A_3 - A_1}{t_3 - t_1}, \quad \text{та} \quad b = \frac{A_2}{M} - \alpha \cdot \frac{t_2}{M}. \quad (5, 6)$$

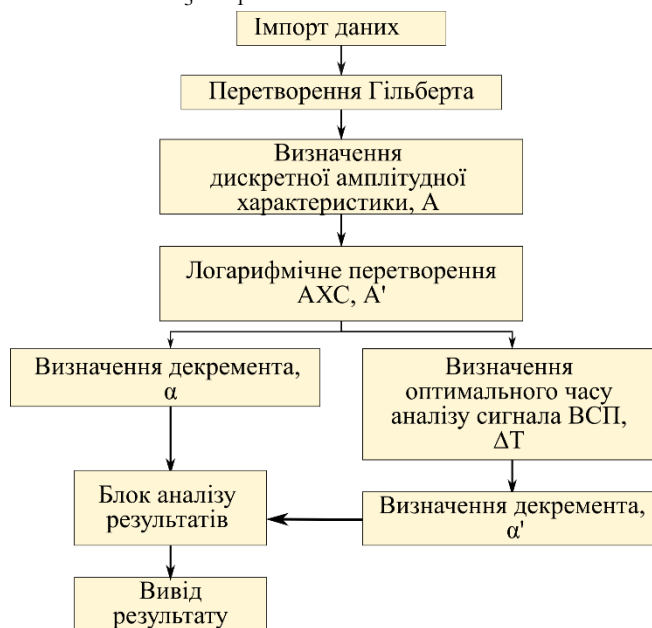


Рис. 2. - Графічне відображення методики опрацювання сигналу ВСП

Розрахунок коефіцієнтів лінійної регресії за отриманими даними моделі становив:  $\alpha = 3.002 \cdot 10^5$ ,  $b = 0.005$ . З урахуванням отриманих результатів було проведено оцінювання похибки визначення функції  $A(t)$  за формулами:

$$A(t) \pm \Delta_{A, \text{сер}}(t) = e^{y(t) \pm \Delta_{\text{лін.}\bar{y}}(t)} \quad \text{та} \quad A(t) \pm \Delta_A(t) = e^{y(t) \pm \Delta_{\text{лін.}y}(t)}, \quad (7, 8)$$

де  $\Delta_{A, \text{сер}}(t)$  та  $\Delta_A(t)$  - межі похибки середніх та індивідуальних значень обвідної, відповідно;  $\Delta_{\text{лін.}\bar{y}}(t)$  та  $\Delta_{\text{лін.}y}(t)$  - межі похибки середніх та індивідуальних значень лінеаризованої функції  $y(t)$ , відповідно.

Згідно проведених раніше досліджень [6] встановлено, що для мінімізації похибки визначення інформативних параметрів сигналу ВСП (1) в умовах імпульсного збудження, необхідно обирати інтервал часу аналізу сигналу з умови:

$$\alpha \Delta T \approx 1,10889. \quad (9)$$

Визначивши час аналізу сигналу ВСП  $\Delta T$  за формулою (9), був зроблений перерахунок декременту  $\alpha'$  за формулою (5).

**Результати та їх обговорення.** На рис. 3 (1 - сигнал перетворювача, 2 – тренд АХС, 3 - для середніх значень декременту сигналу, 4 - довірча область регресії для індивідуальних значень декременту сигналу) проілюстровані отримані результати визначення параметрів нелінійної регресії та наведені графіки довірчих областей регресії для розрахованих коефіцієнтів декременту сигналу ВСП з використанням тренда АХС із заданою вірогідністю ( $P = 0.95$ ).

З графіків видно, що з метою мінімізації похибки визначення декременту сигналу ВСП доцільно вибирати для аналізу середню частину цього сигналу з найменшим значенням дисперсії.

За результатами проведеної серії модельних експериментів у кількості 100, отримано відхилення в значенні декременту  $\alpha$  сигналу перетворювача, розрахованого за лініями



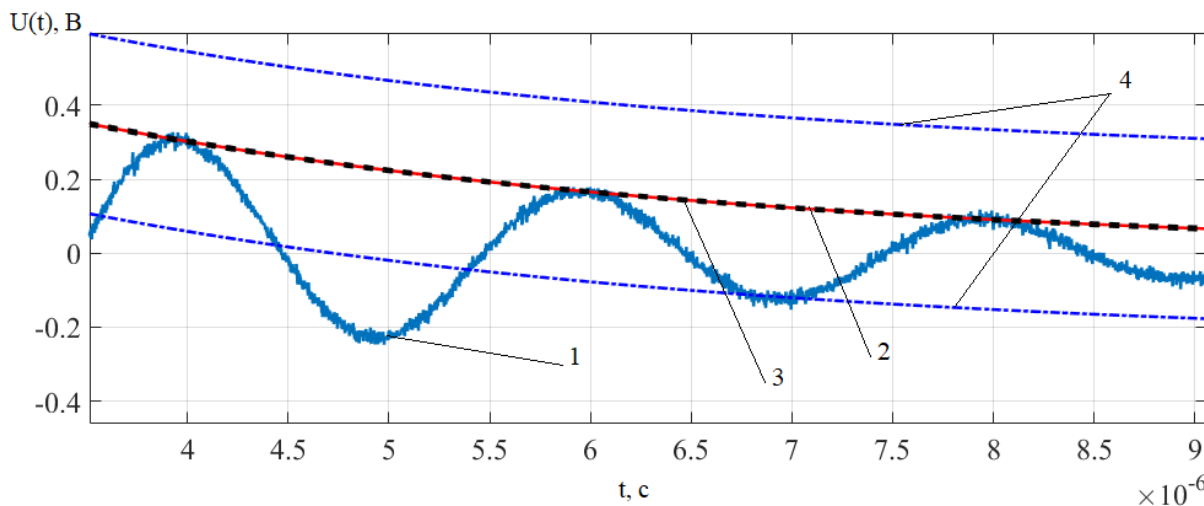


Рис. 3 - Фрагмент сигналу ВСП і межі довірчих областей регресії для значень АХС

регресії АХС, від заданого при моделюванні не більше 2,5%. У разі визначення декременту  $\alpha$  з урахуванням оптимального часу аналізу, похибка не перевищувала 1,5%.

**Висновки.** У даній роботі наведені результати дослідження впливу вибору часу аналізу загасаючого гармонічного сигналу імпульсного ВСК на похибку визначення декременту цього сигналу. За результатами моделювання встановлено, що час аналізу сигналу доцільно обирати рівним або близьким до оптимальному часу і в середній області існування загасаючого сигналу перетворювача. Такий підхід дозволяє мінімізувати похибку визначення декременту сигналу ВСП, яка за результатами моделювання не перевищувала 1,5%.

Отримані результати підтверджують можливість використання запропонованого методу підвищення точності визначення декременту сигналу ВСП на основі визначення нелінійного тренда АХС. Враховуючи, що значення декременту сигналу є дуже чутливими до впливу завад, запропонований метод підвищення точності визначення декременту сигналу ВСП може бути застосований для сигналів з низьким рівнем співвідношення сигнал / шум.

### Література

1. Тетерко А.Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А.Я. Тетерко, З.Т. Назарчук; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львов, 2004. - 247 с.
2. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.М. Учанін; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львів: СПОЛОМ, 2013. - 268.
3. Adewale I. Decoupling the Influence of Permeability and Conductivity in Pulsed Eddy-Current Measurements / I.D. Adewale, G.Y. Tian// IEEE Trans. Magn. – 2013. – vol. 49, no. 3. – pp. 1119-1127.
4. Lysenko I. Pulsed eddy current non-destructive testing / Yu. Kuts, A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Болгария, 2017. – №216. – С. 114–117.
5. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: First edition. — JCGM, Switzerland, 1993. – 120 p.
6. Kuts Yu. Analysis of the signal parameters measurement uncertainty at pulsed eddy current non-destructive testing / Yu. Kuts, A. Protasov, Iu. Lysenko, O. Dugin // International Journal “NDT Days” – 2018. – Vol. 1, Iss. 4. –pp. 461-468.
7. Куц Ю. В. Статична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернопіль: Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя, 2009. – 383с.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ПЛОСКОГО ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РАМКАХ ЗАДАЧ ЦИВІЛЬНОГО РОЗМІНУВАННЯ

Овчарук С.А., Баженов В.Г.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

**Анотація.** У статті розглянуто результати дослідження залежності чутливості планарного (плоского) електроємнісного перетворювача з електродами прямокутної форми від відстані між електродами та глибини залягання об’єкта, що підлягає визначенню. Дослідження проводилось шляхом комп’ютерного моделювання.

Розглянуті результати складають окрему частину дослідження потенційних можливостей застосування електроємнісного методу неруйнівного контролю в рамках задач цивільного розмінування, а саме для детектування протипіхотних мін з малим або відсутнім вмістом металу у приповерхневому шарі ґрунту.

**Вступ.** На сьогоднішній день є актуальним питання швидкого, безпечного та ефективного розмінування територій від наслідків бойових дій. Основними методами для вирішення цього питання є застосування металошукачів та георадарів (англ. GPR - Ground Penetrating Radar)[1], [2]. Для виявлення мін з малим або відсутнім вмістом металу застосування металошукачів є неефективним або неможливим. Тому для таких типів мін основним засобом детектування залишається георадар, який в свою чергу також має ряд недоліків та обмежень [1-3], що знижують достовірність сканування та підвищують ризики, пов’язані із здоров’ям та життям людей, тому знаходження допоміжних чи альтернативних методів для цієї задачі є актуальним. Як зазначалося у попередніх дослідженнях [3-5], таким методом є електроємнісний метод.

**Моделювання.** З метою забезпечення високої чутливості перетворювача для різних значень глибини залягання міни було проведено ряд моделювань для визначення ефективної відстані між електродами. Моделювання проводились у програмному середовищі COMSOL Multiphysics, модуль AC/DC. Перетворювач зображено на рис.1., розміри електродів складають 3x4 см.

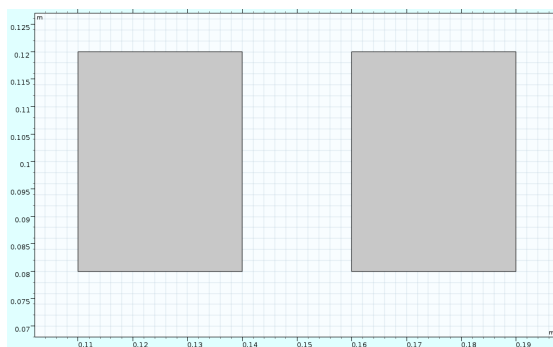


Рис. 1. Геометричні розміри та вигляд перетворювача

Об’єкт, що відповідає міні, є циліндр діаметром 80 мм та висотою 30 мм. Розміри та форма були підібрані у відповідність до розмірів реальних об’єктів - протипіхотних мін з мінімальним вмістом металу (наприклад РМА-3 111x40 мм, VS-МК2 90x32 мм [6]).

Моделювання проводились для значень глибини залягання циліндра: 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 і 4 см, відносна діелектрична стала середовища (ґрунту), в якому знаходиться циліндр, прийнято як  $\epsilon=5$  (що відповідає ґрунту з об’ємним коефіцієнтом вологості

близько 10% [7]), матеріалу тіла самого циліндра  $\epsilon=2.5$  (поліетилен). Для середовища в якому розташовано перетворювач (повітря)  $\epsilon=1$ .

Відстань від перетворювача до поверхні ґрунту - 0 см, тобто перетворювач розташовано на поверхні. Загальні фізичні розміри моделі складають 30x22x20см. Геометрія моделі зображена на рис.11. Шар матеріалу, що відповідає шару ґрунту, має висоту 10 см, шар матеріалу, що відповідає шару повітря, також має висоту 10 см. По периметру геометрії моделі додано шар “Infinite element domain”, товщиною 1 см, що моделює нескінченний простір. Перетворювач розміщено по центру моделі.

Математична модель розраховувалась методом кінцевих елементів (тетраєдрів), мінімальний розмір елемента рівний 0,1 мм, максимальний – 20 мм.

**Результати.** За результатами моделювання було побудовано графік залежностей ємності перетворювача від відстані між електродами за різних глибин залягання циліндра, що відповідає міні, зображений на рис.2. Для порівняння також наведено графік залежності без наявності міні під перетворювачем.

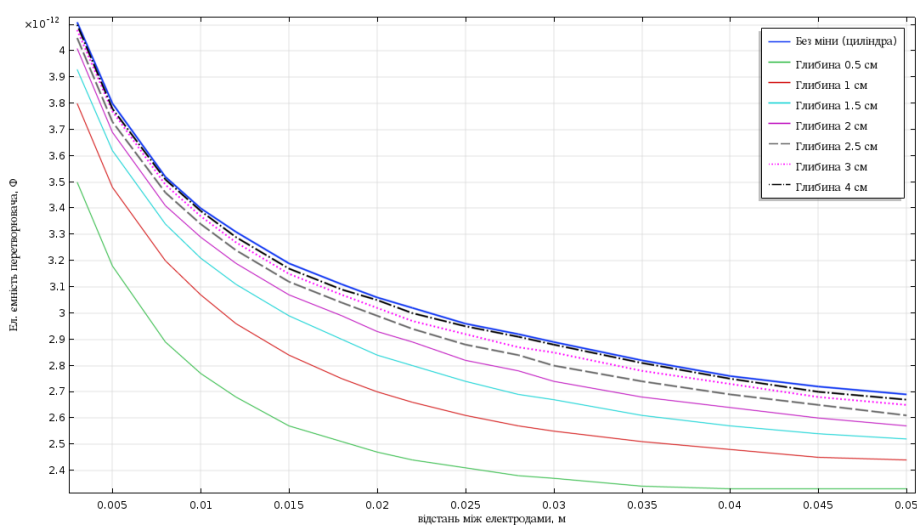


Рис. 2. Графік залежностей ємності перетворювача від відстані між електродами за різних глибин залягання циліндра, за результатами моделювання

Для більшої інформативності результатів також було побудовано графік відносної зміни ємності перетворювача, зображений на рис. 3.

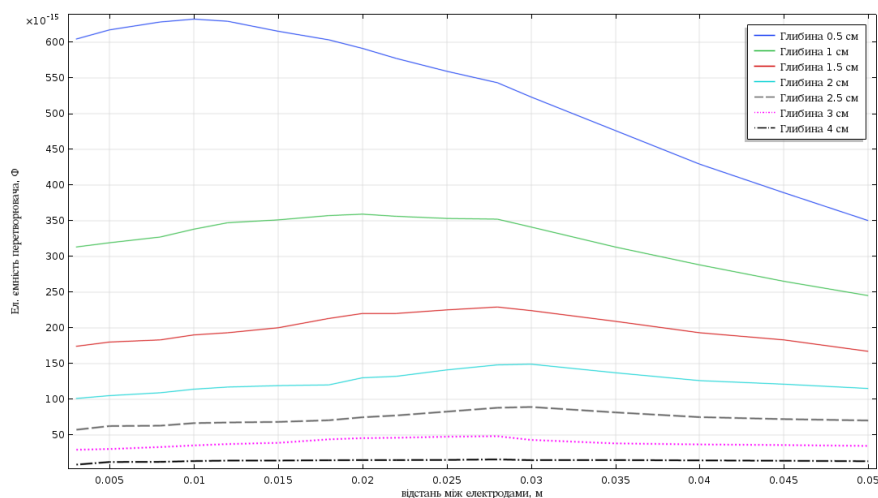


Рис. 2. Графік відносної зміни ємності перетворювача в залежності від відстані між електродами за різних глибин залягання циліндра, за результатами моделювання

**Висновки.** Проведені моделювання дали змогу оцінити відносну величину зміни ємності в залежності від глибини залягання міни, та від відстані між електродами перетворювача.

Результати показують, що для глибин залягання міни від 1 см найбільш ефективна величина відстані між електродами даного перетворювача лежить у межах від 2 до 3,5 см. Також з графіків видно, що вже на глибині залягання міни у 4 см зміна ємності перетворювача наближається до нуля, що практично визначає межу чутливості перетворювача такого типу та розмірів.

Побудовані графіки залежностей дають змогу передбачити більш ефективну конструкцію перетворювача, в тому числі з комбінацією електродів кількістю більшою ніж 2, для підвищення чутливості на різних глибинах залягання міни. Також графіки дають змогу розрахувати орієнтовні параметри схеми вимірювання даним перетворювачем.

### Література

1. Cardona, L., Jimenez, J., Vanegas, N., (2013). *Landmine Detection Technologies to Face the Demining Problem in Antioquia, Dyna*, vol. 81, ss. 115–125.
2. Tesfamariam G., Mali D., (2012). *GPR Technologies for Landmine Detection, International Journal of Computing Science and Communication Technologies, VOL.5 NO.1*, pp. 768-774.
3. Овчарук С.А., Баженов В.Г. (2019). Порівняння чутливості моделей звичайних та диференціальних електроємнісних перетворювачів в рамках задач цивільного розмінування, *Журнал Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2, стор.30-36.
4. Tholin-Chittenden, C., Soleimani, M. (Sept. 2016). *Planar Array ECT Sensor Design Optimisation, Materials of 8th World Congress on Industrial Process Tomography, At Iguassu Falls, Brazil*.
5. Tholin-Chittenden, C., Soleimani, M. (2017). *Planar Array Capacitive Imaging Sensor Design Optimisation, IEEE Sensors Journal*, 99, 1558-1748.
6. Груна авторів (2002). *Project Mimeva, Study of Generic Mine-Like Objects for R&D in Systems for Humanitarian Demining – Final Report. Ispra*.
7. Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1980). *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resources Research*, 16, 574-582.

## RELIABILITY OF TESTING AND ITS DETERMINATION

*S. Maievskiy*

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Determination of testing reliability on base the analysis errors of measurement of testing parameters are considered. The mistakes of testing first and second kinds and reliability are determined with accounting division of errors on systematic and accidental. The way of optimization of choice limit norm of testing parameter is offered.

Reliability of testing [1] – it is mark of propriety separation of the testing parameters on such that correspond to beforehand set the board of standard or on the contrary – are defective.

The testing parameter is the magnitude of the some physical value which reflects the quality of testing object. It can be temperature, distance, concentration of solution and many other physical units and marks. In nondestructive testing as parameter of testing often is use the line dimension of defect or deviation of thickness, velocity of ultrasound wave spread in testing material and so on.

It is clear that realization of testing process is executing by measurement the magnitude of deviation testing parameter relatively to its nominal significance but it is necessary only for its separation on standard or defective after comparison with admissible magnitude of deviation – the border of norm.

The main characteristic of deviation testing parameter is the law distribution of its density probability. There are twain law of distribution accidental values which can be used for analysis of testing parameters. It is the normal law if this parameter is changing as in side of decrease so and in side of increase relatively the mathematic expectance what equal zero and law of module normal value for parameters what is changing only in one side relatively also zero mathematic expectance. For such laws the dependence of density distribution is equal

$$P(\delta) = \frac{e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}, -\infty < \delta < +\infty, \quad (1)$$

There  $\sigma$  - standard deviation of testing parameter.

The normal law can be applied for distribution of deviation of the thickness or distance relatively its nominal value, for distribution of temperature of testing object, evaluation of deviation any physical parameter relatively beforehand set its level. The law distribution of density probability of module normal value is apply in non-destructive testing for description of such parameter as size of defect of internal structure of testing object's material. Zero of mathematic expectance deviation of the defect dimensions means being maximum probability of absence defect in testing material.

The errors of the measuring of testing parameters are causing the mistakes referring the result of testing to norm or defective. There are possible to discern the two kinds of mistakes: mistake of the first kind what answer for incorrect referring normal parameter to defective and so undesirable mistake of the second kind when defective parameter have been confessing as correct.

For evaluation of mistakes it is necessary a priori to know the law of density distribution of probability accidental value of testing parameter and error of measuring for significant of testing parameter equal of board of norm. Thereto have to be known the maximum deviation of testing parameter and limit of norm ( $\pm\delta_{max} \pm \delta_N$ ) for normal law and  $\delta_N$ , - for law of module normal value)

Accordingly so-called rule “three sigma” the evaluation of standard deviation of testing parameter  $\sigma$  normal and module of normal lows of density distribution can be determined as

$$\sigma = \frac{\delta_{max}}{3}, \quad (2)$$

There  $\delta_{max}$  is limits 99,7% (practically 100%) probability deviation of testing parameters.

The errors of testing parameter measurement have to be separate determined on systematic and accidental. The sum of systematic additive and multiplicative components of error  $\Delta_i$  can be determine by add up arithmetically:

$$\Delta_{sum.} = \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (3)$$

Herewith the multiplicative error take into account only for significant of testing parameter what approximately equal the board of norm.

Systematic error (3) caused to the mistake of testing the kind of which is depend from its sign. Herewith the mistake can arise only for significant of testing parameters directly near to level of board norm. So positive sign of sum systematic error in case nondestructive testing directed to detection defects of internal structure of the materials the mistake of first kind to take place for defects the significant of which is correspond  $\delta_N - \Delta_{sys.} \leq \delta \leq \delta_N$  (Fig. 1.):

$$P_I = \int_{\delta_N - \Delta_{sys.}}^{\delta_N} P(\delta) d\delta \quad (4)$$

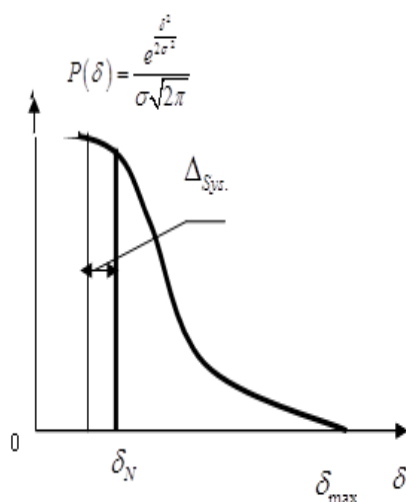


Fig.1. Mistake of the first kind owing of systematic error

When sign of systematic sum error is negative take place the mistake of second kind for significances of parameters  $\delta_N \leq \delta \leq \delta_N + |\Delta_{sys.}|$ :

$$P_{II} = \int_{\delta_N}^{\delta_N + |\Delta_{sys.}|} P(\delta) d\delta \quad (5)$$

For case of normal law of deviation testing parameter systematic error independently from its sign will cause the mistakes both first and second kinds (Fig.2.). The positive sign of systematic error  $\Delta_{sum.}$  is reason the mistake of second kind for significant of testing parameters  $(-\delta_N - \Delta_{sys.}) \leq \delta \leq (-\delta_N)$  and mistake of first kind

$$P_I = \int_{-\delta_N - \Delta_{sys.}}^{-\delta_N} P(\delta) d\delta \quad (6)$$

$$P_{II} = \int_{-\delta_N}^{-\delta_N - \Delta_{sys.}} P(\delta) d\delta \quad (7)$$

The probabilities of mistakes (6) and (7) are considering as dependent evaluations because testing parameter do not be simultaneously belong to both different interval of testing parameters. Thus compatible probability of mistake  $P_I, P_{II}$  is equal the sum of its evaluations:

$$P_{mist.} = P_I + P_{II} \quad (8)$$

Consideration influence of accidental errors on the evaluation of mistakes of the testing we begin from determination of sum significance its deviation.

Herewith we have to a count that evaluation of each accidental error is determined as standard deviation what depends from the law of its distribution density probability and equal square root from its dispersion.

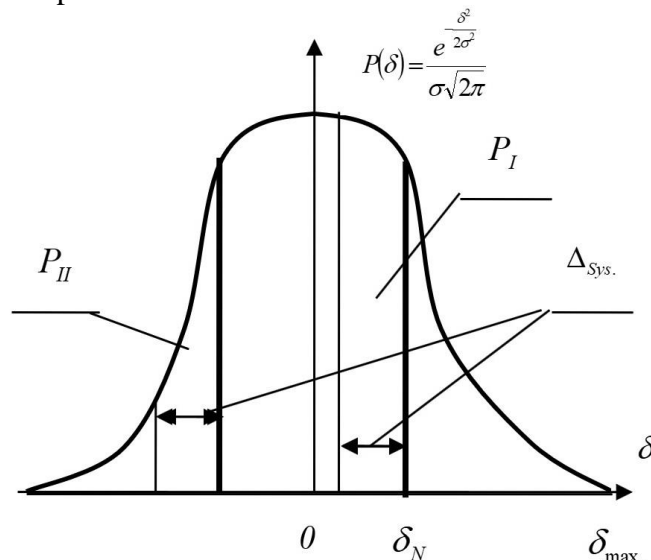


Fig.2. Mistakes first and second kinds  
account of systematic error

For instance we'll demonstrate calculation of standard deviation  $\sigma_{ADP}$  of error analog- digital performer (ADP) the accidental error of which in limits  $\pm \frac{\Delta_{ADP}}{2}$  ( $\Delta_{ADP}$ - the lower gradation of ADP in significance of testing value) have of density probability equal  $P_{ADP}(\delta) = \frac{1}{\Delta_{ADP}}$ :

$$\sigma_{ADP} = \sqrt{\int_{-\frac{\Delta_{ADP}}{2}}^{\frac{\Delta_{ADP}}{2}} \delta^2 P_{ADP}(\delta) d\delta} = \frac{\Delta_{ADP}}{2\sqrt{3}}$$

In case if in process analysis of exactness measuring is manifested a several (m) accidental errors the sum of standard deviation is determined as square root from its sum dispersion:

$$\sigma_{sum.} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sigma_j^2} \quad (9)$$

The standard deviations of errors we regard as row of accidental number what have normal law of density probability. Such allowance is made possible for enable to determine the maximum deviation of sum accidental errors according to above mentioned rule for normal low:

$$\pm \Delta_{Acc.} = \pm 3\sigma_{sum.} \quad (10)$$

Existence only accidental error of measuring become a rise of mistakes both kind. The evaluation of mistakes testing defects in material have been determining compatible possibility of coincidence measuring parameter with its significances  $\Delta_N - \Delta_{Acc.} \leq \delta \leq \Delta_N$ ,  $\Delta_N \leq \delta \leq \Delta_N + \Delta_{Acc.}$  and probability of the error's sign what equal 0,5. These probabilities are independent therefore compatible evaluation have been corresponding of its multiplication. In such case the mistakes of testing can be determined next equations:

$$P_I = 0,5 \int_{\Delta_N - \Delta_{Acc.}}^{\Delta_N} P(\delta) d\delta \quad (11)$$

$$P_{II} = 0,5 \int_{\Delta_N}^{\Delta_N + \Delta_{Acc.}} P(\delta) d\delta \quad (12)$$

Now we shall have considered mutual influence the systematic and accidental errors on mistakes of testing when density probability of deviation of testing parameter is corresponds to normal law. If absolute significance maximum deviation of accidental error is less than systematic for example positive error there is presents only mistake of the first kind (Fig.3):

$$P_I = \int_{\Delta_N - \Delta_{Sys.}}^{\Delta_N} P(\delta) d\delta + 0,5 \int_{\Delta_N - \Delta_{Sys.} - \Delta_{Acc.}}^{\Delta_N - \Delta_{Sys.}} P(\delta) d\delta \quad (13)$$

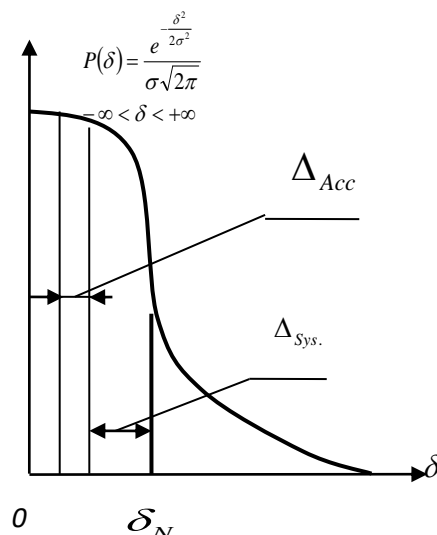


Fig.3. Mistakes of first kind on account of systematic and accidental errors

In case when significance of maximum deviation accidental error exceed the systematic error besides mistake of the first kind (13) there is presents the mistake of the second kind:

$$P_{II} = 0,5 \int_{\Delta_N}^{\Delta_N - \Delta_{Sys.} + \Delta_{Acc.}} P(\delta) d\delta \quad (14)$$

For testing parameter what conformed to normal law of its distribution there are need count more the two similar of mistakes for intervals of testing parameters around another limit of norm:

$$P^1_I = 0,5 \int_{-\delta_N}^{(-\delta_N - \Delta_{Sys.} - \Delta_{Acc.})} P(\delta) d\delta \quad (15)$$

$$P^1_{II} = \int_{(-\delta_N - \Delta_{Sys.})}^{-\delta_N} P(\delta) d\delta + 0,5 \int_{(-\delta_N - \Delta_{Sys.} - \Delta_{Acc.})}^{(-\delta_N - \Delta_{Sys.} + \Delta_{Acc.})} P(\delta) d\delta \quad (16)$$

For such distribution of testing parameters final evaluation of mistake answer the sum of mistakes fist and second kinds as dependent possibilities:

$$P_{mist.} = P_I + P_{II} + P^1_I + P^1_{II} \quad (17)$$

Then evaluation of authenticity of testing can be determined as a sum of probability. Certain deficiency the reliability as evaluation of testing is its independence from quantitative characteristic such as limit of norm. It particularly is been showed if maximum of testing parameter deviation is a lot more than limit of norm. We can receive a high evaluation of reliability but all or more part of norm parameters can be confess as defective or on the contrary - can be replace by defective. For exception similar result of testing is need to optimize selection of significance norm limit. For it as additional regulator [2] can be used some coefficient of quantitative quality  $k$  which have to be more 0,5:

$$k = 1 - \frac{P_{mist.}}{P_N}, \quad (18)$$



here -  $P_N = \int_0^{\delta_N} P(\delta) d\delta$  - probability of norm for parameters with distribution of density probability by law module of normal value and for testing parameter with distribution of density probability accordingly normal law -  $P_N = \int_{-\delta_N}^{\delta_N} P(\delta) d\delta$ .

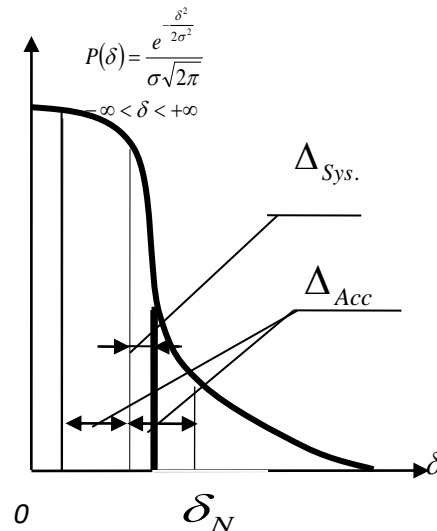


Fig.4. Example of mistakes first and second kinds on account of existence accidental error more than systematic.

Above considered methodic of authenticity analysis can be effective in development the new systems for testing physical and other parameters in different direction of science and technology. In advance set limitation of authenticity make possible to determine the needful technical requirements for each functional cell of system.

Separate determination mistakes of testing both kinds in realizations of nondestructive testing are permit with minimum loss to diminish probability to pass inadmissible defect by correct increasing of mistake the first kind.

## References

1. W.E.Gardner. *Improving the Effectiveness and Reliability of Non-Destructive Testing. 1 Edition. eBook ISBN 97 814 832 869 83. handbook, second edition, vol. 7) 1991.*
2. С.М.Маевский. *Относительная достоверность – объективная оценка качества контроля. К. Техническая диагностика и неразрушающий контроль №2 2010 с. 24 – 27.*

## ПОТУЖНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО – АКУСТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ

*Салам Буссі ЕП. Мішел Кассаблі,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

Переваги електромагнітно – акустичного (ЕМА) методу ультразвукової діагностики при контролі металовиробів (листів, труб, рейок, заготовок тощо) без спеціальної підготовки поверхні широко відомі [1]. В той же час більшість фахівців в галузі неруйнівного контролю [2] вважають, що чутливість ЕМА контролю низька. ЕМА перетворювачі (ЕМАП) мають значні габарити. Сила протягування ЕМАП до феромагнітних виробів значна, що затрудняє сканування об’єктів контролю (ОК), особливо при проведенні «ручної» діагностики.

Для підвищення чутливості контролю з допомогою ЕМАП підвищують величину індукції поляризуючого магнітного поля [3], або збільшують потужність генераторів зондуючих імпульсів [3]. Проте такі технічні рішення мають обмеження.

Автором запропоновано новий варіант ЕМАП, який вирішує задачу підвищення чутливості контролю методом.

На рис.1 наведено спрощена конструкція ЕМАП з імпульсним магнітним полем.

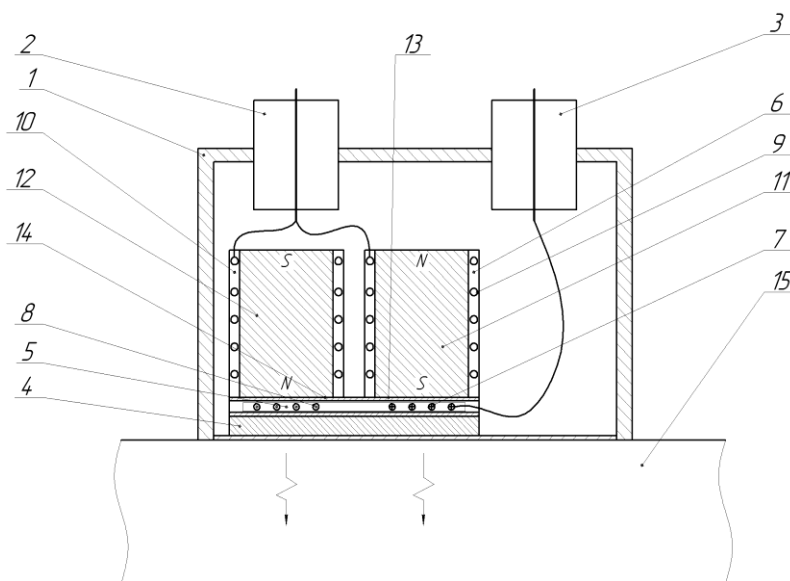


Рис.1. Спрощена конструкція ЕМАП на поверхні ОК

На рис. 1 позначені: 1 – корпус; 2 і 3 електричні з'єднувачі; 4 – протектор; 5 – плоска високочастотна котушка індуктивності; 6 – джерело магнітного поляризуючого поля; 7 і 8 – лінійні робочі ділянки паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності; 9 і 10 – дві видовжені котушки індуктивності; 11 і 12 – сердечники з феромагнітного матеріалу; 13 і 14 – торці сердечників; 15 – ОК. Стрілками показано напрямки

розповсюдження збуджених ультразвукових імпульсів.

Схему взаємного розташування плоскої високочастотної котушки індуктивності 5 і двох 9 і 10 видовжених котушок індуктивності з сердечниками 11 і 12 наведено на рис.2 (позначення такі ж, як і на рис.1).

ЕМАП працює наступним чином. ЕМАП, який має корпус 1, розташовують на поверхні ОК 15, як це зображено на фіг.1, так, щоб протектор 4 прилягав до поверхні ОК 15.

В процесі роботи ЕМАП в дві видовжені котушки індуктивності 9 і 10 з сердечниками 11 і 12 з феромагнітного матеріалу джерела магнітного поля 6 через електричний з'єднувач 2 подається імпульс струму  $I$  прямокутної форми з заданою часовою тривалістю  $T$ , рис.3а. Оскільки дві видовжені котушки індуктивності 9 і 10 електрично з'єднані між собою зустрічно по магнітному полю, то на торцях 13 і 14

сердечників 11 і 12 відповідно формується поляризує магнітне поле з протилежно направленими векторами магнітної індукції, які діють на поверхневі шари ОК 15 під лінійними робочими ділянками 7 і 8 паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності 5. Оскільки поляризує магнітне поле діє короткий проміжок часу  $T$ , рис.3а, як правило кілька сотень мікросекунд, то ЕМАП практично не притягується до ОК 15. Час робочої експлуатації суттєво збільшується за рахунок зменшення зносу протектора перетворювача.

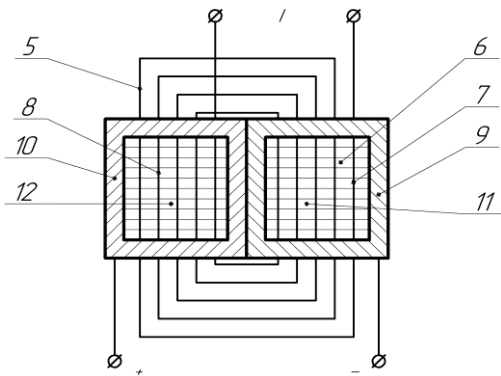


Рис.2. Схема розміщення котушок ЕМАП

Взаємодія магнітного поля і високочастотного електромагнітного поля в поверхневому шарі ОК 15 призводить до збудження ультразвукових імпульсів з однаковою фазою, які розповсюджуються в об'ємі ОК 15. Відбиті з ОК 15 ультразвукові імпульси приймаються, імпульс  $d$  рис.3б, за рахунок зворотного ЕМА перетворення плоскою високочастотною котушкою 5 індуктивності. Протектор 4 захищає ЕМАП від пошкоджень поверхнею ОК 15.

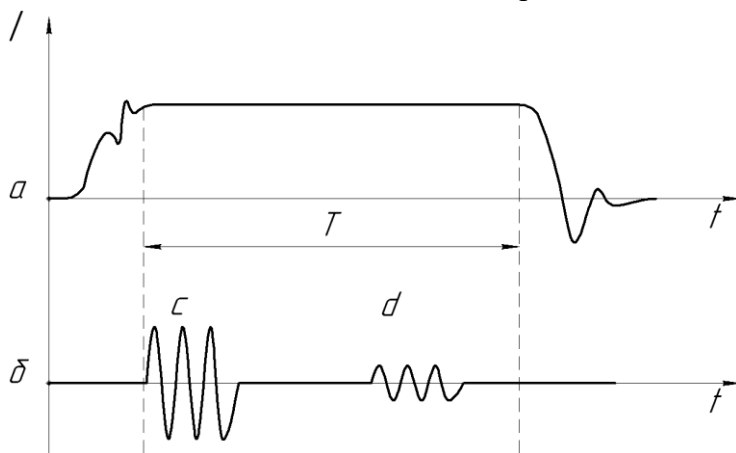


Рис.3. Часові розгортки для струмів живлення котушок

Одночасно зі створеним імпульсним поляризує магнітним полем в плоскій високочастотній котушці індуктивності 5 через з'єднувач 3 збуджується імпульс високочастотного струму живлення  $c$ , рис.3б. В результаті в поверхневому шарі ОК 15 під лінійними робочими ділянками 7 і 8 паралельних провідників плоскої високочастотної котушки індуктивності 5 створюється імпульс високочастотного електромагнітного поля.

Експериментальні дослідження роботи розробленого ЕМАП підтвердили задану виявляємость внутрішніх дефектів ОК при відсутності притягування перетворювача до поверхні феромагнітного виробу.

Виражаю глибоку вдячність науковому керівникові професору Сучкову Г.М. за творчу допомогу та конструктивну критику.

### Література

1. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. - 2004. - № 3. - С. 8-10.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
3. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография. Х.: ТОВ «Планета-принт», 2016. 230 с.

## ІСТОРІЯ ТА ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ СТАНДАРТУ ДСТУ EN 4179:2017

*В.П. Коваленко*  
*ДП «Антонов», м. Київ*

**Вступ.** ДСТУ EN 4179:2017 «Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу неруйнівного контролю» прийнято як національний стандарт методом підтвердження наказом ДП «УкрНДНЦ» № 224 від 14.08.2017 р. В основу покладено європейський стандарт EN 4179:2017.

**Основні відмінності між ДСТУ EN 4179 та ДСТУ EN ISO 9712.** Коротко розглянемо головні відмінності вимог цього стандарту від вимог стандарту ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю». Головною відмінністю є те, що стандарт регулює систему сертифікації на основі роботодавця, а не централізовану систему як ISO 9712. Системи сертифікації на основі роботодавців - це системи, в яких роботодавці відповідають за управління навчанням та кваліфікаційними екзаменами власних працівників. Стандарт EN 4179 стосується спеціалістів НК, які задіяні виключно в аерокосмічній галузі.

Згідно з стандартом, сертифікація проводиться під керівництвом Відповідального Рівня 3. Всі роботодавці, які мають у своєму штаті спеціалістів, сертифікованих згідно EN 4179, або які планують проведення робіт з сертифікації, повинні призначити у письмовій формі Відповідальних Рівня 3, які будуть діяти від імені роботодавця у питаннях, що стосуються процесу кваліфікації та сертифікації персоналу. Відповідальний Рівня 3 повинен бути сертифікованим, згідно EN 4179, в якості спеціаліста Рівня 3, з одного або декількох методів неруйнівного контролю, які застосовуються у роботодавця. Відповідальним Рівня 3 можна призначити спеціаліста, який не працює в організації роботодавця. Відповідальний Рівня 3 повинен розробити та затвердити письмову процедуру проведення сертифікації працівників роботодавця.

Згідно з EN 4179 кваліфікація спеціалістів може бути проведена внутрішніми або зовнішніми агенціями. Внутрішні агенції - це агенції, що входять до складу організації роботодавця. Вони можуть проводити навчання та кваліфікаційні екзамени виключно робітникам роботодавця. Зовнішні агенції - це, відповідно, незалежні від роботодавця агенції. Навчання і кваліфікаційні екзамени може проводити одна агенція або дві різні агенції.

У випадку залучення до процесу кваліфікації зовнішньої агенції, остаточне рішення про її відповідність вимогам роботодавця та рішення про здатність цих агенцій провести навчання та екзамени, приймає Відповідальний Рівня 3. При цьому слід враховувати відсутність в EN 4179 вимоги щодо наявності у зовнішньої агенції сертифікату відповідності, згідно з EN ISO 17024, якщо ця вимога не встановлена місцевими нормативними актами. Запланована до проведення робіт з кваліфікації, зовнішня агенція зобов'язана надати роботодавцю, в особі Відповідального Рівня 3, всі необхідні відомості та матеріали що стосуються кваліфікації його працівників.

Відповідальний Рівня 3 затверджує:

- програми і кількість годин навчання та стажування кандидатів на сертифікацію;
- викладачів та інструкторів, які будуть задіяні в процесі підготовки;
- навчальні матеріали;
- час та місце проведення навчання і стажування;
- екзаменаторів;
- екзаменаційні питання;

- час і місце проведення екзаменів тощо.

Тобто, процесом кваліфікації працівників роботодавця у повному обсязі керує Відповідальний Рівня 3.

EN 4179 розглядає можливість залучення до процесу кваліфікації спеціалістів НК Національної ради неруйнівного контролю в аерокосмічній галузі. Хоча в ньому зазначено також, що наявність такої Ради є необов'язковою. Питання необхідності залучення Ради розглядаються нижче.

Стандарт визначає Раду як незалежну національну аерокосмічну організацію, яка представляє генеральних підрядників національної аерокосмічної промисловості і в яку вони входять та яка визнана державними регулюючими органами, що наймається генеральними підрядниками з метою забезпечення або підтримки кваліфікації та проведення екзаменів фахівців з неруйнівного контролю.

Відповідальний Рівня 3 може використовувати Раду з метою:

- розробки програм навчання і визначення навчальних матеріалів;
- розробки екзаменаційних питань і проведення екзаменів;
- затвердження зовнішніх і внутрішніх агенцій;
- призначення екзаменаторів, викладачів тощо.

Представники країни, в якій рада не створена, можуть користуватись послугами рад інших країн.

Слід зауважити, що згідно з попередньою версією стандарту від 2009 р., всі призначення та затвердження (ідеться про зовнішні агенції, програми навчання, екзаменаційні білети, викладачів, екзаменаторів тощо) могли бути здійснені Відповідальним Рівня 3 або Радою. Починаючи з версії стандарту від 2017 р., всі затвердження здійснює виключно Відповідальний Рівня 3. Рада може лише рекомендувати або погоджувати такі призначення.

**Деякі подробиці з історії виникнення стандарту EN 4179.** Наприкінці ХХ століття обставини склались таким чином, що на території США і на території країн Європи діяли різні стандарти з підготовки спеціалістів НК в аерокосмічній галузі: в США - MIL-STD-410, а починаючи з 1996 р. NAS 410, які передбачали сертифікацію роботодавцем; в Європі - EN 473, який мав сектор авіації та передбачав використання незалежного органу сертифікації персоналу.

При поставках своєї авіаційної техніки (і не тільки цивільної) у Європу, в договірних умовах на поставку, американські виробники прописували необхідність виконання робіт з НК спеціалістами, сертифікованими згідно NAS 410. Головним аргументом було використання розробниками і виробниками авіаційної техніки специфічних, характерних лише для них методик проведення робіт з НК, яких не могли знати незалежні органи з сертифікації персоналу і тому вони не могли повністю задовольнити вимоги аерокосмічної галузі щодо сертифікації персоналу неруйнівного контролю.

Ідею гармонізації стандартів підготовки фахівців НК підтримала Асоціація європейських Аерокосмічних виробників (АЕСМА), розробивши стандарт EN 4179. Перший варіант стандарту було прийнято у 2000 р. Він був близьким до змісту NAS 410, але мав і відмінності. Наприклад, передбачав більшу кількість годин навчання, практичного досвіду тощо.

У результаті домовленостей між Федеральними авіаційними органами США (FAA) та Європейською Агенцією Авіаційної Безпеки (EASA), було досягнуто спільної угоди про гармонізацію стандартів EN 4179 та NAS 410. У лютому 2003 р. був підписаний меморандум про внесення узгоджених змін у ці стандарти.

Настала черга американців. Першим кроком до гармонізації двох стандартів став американський стандарт NAS 410:2003, який американці зробили еквівалентним EN 4179:2000.

З того часу ми маємо стандарт EN 4179 у версіях 2005 р., 2009 р. та 2017 р. який повністю гармонізований з американським стандартом NAS 410 у версіях 2003 р., 2008 р. та 2014 р.

**Питання необхідності функціонування Національної ради неруйнівного контролю в аерокосмічній галузі.** Вся діяльність авіаційної галузі на території Європейського союзу і країн які приєдналися до європейської системи забезпечення безпеки авіаційних перевезень регулюються Авіаційними правилами, які розробляє і виконання яких контролює EASA.

Україна приєдналась до цієї системи 9 грудня 2009 р. Підписана у 2014 р. угода про асоціацію з Європейським союзом посилила відповідальність України за виконання взятих на себе зобов'язань щодо відповідності європейським правилам з безпеки авіаційного транспорту.

Наразі в Україні чинними є авіаційні правила, які гармонізовані з європейськими правилами EASA і які встановлюють вимоги щодо організацій авіаційної галузі, які використовують, серед іншого і НК:

- Part-21 «Сертифікація повітряних суден, пов'язаних з ними виробів, компонентів та обладнання, а також організацій розробника та виробника»;
- Part-145 «Правила схвалення організацій з технічного обслуговування»;
- Part-M «Правила підтримання льотної придатності».

У нормативних документах Part-21 (АПУ-21) зазначено, що персонал, який виконує неруйнівний контроль, повинен бути належним чином кваліфікований. Тобто, в Україні, на підприємствах – розробниках або виробниках авіаційної техніки, персонал НК може бути кваліфікованим відповідно до стандартів ISO 9712 або EN 4179.

А от у Part-145 та Part-M, які стосуються організацій з технічного обслуговування повітряних суден та підтримання льотної придатності, тобто організацій які виконують НК літаків, що знаходяться в експлуатації, зазначено, зокрема, наступне:

- належним чином кваліфікований означає, що персонал відповідає рівням 1, 2 чи 3 як це визначено стандартом EN 4179;
- незважаючи на загальні посилання в EN 4179 на Національний комітет, всі іспити мають проводитись персоналом чи організаціями під контролем такого комітету. За відсутності національного комітету може бути залученим комітет іншої країни учасника.

Перше посилання на EN 4179 з'явилося в Part-145 у 2000 р., одразу після прийняття стандарту. З цього моменту у країнах Євросоюзу почали виникати національні авіаційні Ради з НК, головним завданням яких стала організація робіт з кваліфікації персоналу. Зрозуміло, що у радах різних країн бачення реалізації на практиці вимог стандарту було різним. Це викликало необхідність створення органу, який би координував діяльність рад у реалізації вимог EASA щодо кваліфікації персоналу НК.

Пропозиція з створення Форуму авіаційних рад була оголошена та проголосована на 9-й європейській конференції з НК, яка проходила в Берліні, у вересні 2006 р. В матеріалах конференції говориться, що головною метою створення Форуму європейських рад під егідою Європейської федерації НК є необхідність в реалізації зазначених в Part-145 та Part-21 вимог EASA, шляхом:

- обговорення питань, які викликають спільну зацікавленість всіх рад;
- узгодження методології підготовки персоналу НК та проведення екзаменів у всіх країнах-членах Форуму;
- забезпечення присутності на Форумі представників EASA та погодження з ними прийнятих рішень;
- використання Форуму як дорадчого органу для нових рад, які будуть створюватись;

- погодження спільних вимог для органів, що здійснюють навчання та проводять кваліфікаційні іспити у різних країнах;
- узгодження еквівалентності письмових процедур, розробку яких регламентує EN 4179;
- забезпечення механізму інтерпретації вимог та арбітражу у суперечках тощо.

Було прийнято рішення про делегування на засідання кожною радою-членом Форуму двох своїх представників. Двох представників делегує EASA. Засідання Форуму проводять не рідше одного разу на рік.

Нині Форум авіаційних рад налічує представників від 20 національних рад, що представляють 22 країни (Данія, Швеція та Норвегія мають одну спільну раду на три країни). Форум декларує повну відкритість і готовий прийняти у свої члени національну раду будь-якої країни, яка демонструє готовність до координації своїх дій з іншими країнами-учасниками при підготовці фахівців НК. Наприклад, до Форуму входять ради Туреччини (асоційований член ЄС, як і Україна), а також Австралії.

EASA, при схваленні організацій з технічного обслуговування, що виконують роботи з НК, визнає лише ті кваліфікаційні сертифікати, які видані агентствами, що мають схвалення однієї з рад-членів Форуму.

На сьогоднішній день в Україні створена Українська національна аерокосмічна рада з неруйнівного контролю. Відбулися установчі збори, прийнято статут Ради. Від Державної авіаційної служби України, як національного регулюючого органу, надійшов лист-схвалення діяльності Ради з контролю та координації процесів кваліфікації спеціалістів НК. На черзі – завдання з розробки Радою необхідних для цього документів та направленням заявки на прийняття Ради у члени європейського Форуму.

**Огляд проекту оновленого стандарту EN 4179.** У квітні 2019 р. опубліковано проект стандарту prEN 4179:2019 р. Які ж зміни чекають нас в стандарті EN 4179:2017 р.? Привертають увагу такі відмінності:

- в п 1.1 «ПРИЗНАЧЕННЯ» зникло посилання на необхідність сертифікації згідно з стандартом EN ISO 17024 у випадках встановлення такої вимоги місцевими нормативними актами;
- всі положення стандарту, що стосуються кваліфікації на Рівень I – обмежений винесені в окремий Додаток. При цьому змін у самих вимогах стандарту не сталося;
- всі положення стандарту, що стосуються діяльності Національної аерокосмічної ради з неруйнівного контролю також винесені в окремий Додаток.

А от у вимогах щодо діяльності Національних рад відбулися зміни, які слід розглянути більш детально.

Стандарт EN 4179:2017 визначає, що членами керівного органу ради з вирішальним голосом повинні бути фахівці 3 Рівня кваліфікації з неруйнівного контролю, які представляють генеральних підрядників або власників сертифікатів типу, як мінімум. Визначення, кого ж можна вважати представником генерального підрядника (в англійському варіанті «prime contractor»), викликало багато дискусій на Форумі авіаційних рад. В prEN 4179:2019 формулювання цього визначення виглядає більш чітким: «Члени з правом вирішального голосу повинні бути, як мінімум, персоналом Рівня 3 і представляти організації, що займаються проектуванням, виробництвом та/або технічним обслуговуванням і які мають схвалення Регулюючого Органу країни».

Проект стандарту доповнений вимогами щодо складу робочих процедур, які повинні бути розробленими та затвердженими Радою. Визначено перелік документів, які повинні бути розміщеними на веб-сайті Ради. Прописані рекомендації з проведення аудитів агенцій, які проводять кваліфікаційні іспити. Зазначено, що зовнішні агенції

в країні можуть бути схваленими не лише національною радою, а і іншими радами, які є членами Форуму аерокосмічних рад.

Необхідно відзначити що головною метою впровадження в Україні стандарту ДСТУ EN 4179 і проведення робіт зі створення Української національної аерокосмічної ради з неруйнівного контролю, є приведення процесу кваліфікації спеціалістів НК авіаційної галузі України у відповідність з європейськими вимогами та отримання ним міжнародного визнання.

### **Література**

1. ДСТУ EN 4179:2017 (EN 4179:2017, IDT) Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю.
2. ДСТУ EN ISO 9712:2014 Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю (EN ISO 9712:2012, IDT).
3. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРИЙНЯТНИХ МЕТОДІВ ВСТАНОВЛЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ ТА КЕРІВНИЙ МАТЕРІАЛ (AMC&GM) до Правил схвалення організацій з технічного обслуговування (Part-145) : веб-сайт. URL: [https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2017/02/Pravila-shvalennya-organizatsiyi-z-TO\\_AMCGM-Part-145.pdf](https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2017/02/Pravila-shvalennya-organizatsiyi-z-TO_AMCGM-Part-145.pdf).
4. Overall NDT Quality System: веб-сайт. URL: <http://www.efndt.org/Portals/14/doc/EFNDT%20Guidelines%20Issue%201.pdf>.
5. European Forum for National Aerospace NDT Boards: веб-сайт. URL: <http://www.efndt.org/Organisation/Forums/Forum-on-Aerospace>.  
Roubini MARINI, Paraskevas RANOS, Hellenic Aerospace Industry S.A., Schimatari, Greece  
Current Issues in Qualification and Certification of Non-Destructive Testing Personnel in the Aerospace Industry: веб-сайт. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.3.6.5.pdf>



## MODELING OF ULTRASONIC SIGNALS IN DIAGNOSTIC DEVICES

*Povshenko O., Protasov A., Petryk V.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

**Introduction.** The transition of hardware to digital data processing has several advantages over analog. Digital information can be stored, transmitted and reproduced at any time. Digitalization of data opens up wide possibilities for their application.

It is necessary to simulate some components of the circuit to determine their full capabilities in the design of diagnostic devices and systems. For these purposes, there are a number of software tools that allow you to virtually reproduce various processes and event development [1, 2]. On the other hand, there is no one completely universal or correct way to solve a separately set task.

The circuit transients during ultrasound diagnostics are quite situational, and not everyone can get real experimental data. Deriving a generalized technique for mathematically reproducing the process of propagation of acoustic waves in a solid medium will simplify the process of modeling receiving nodes and processing the measuring signal.

The active development of wireless data technology is opening up the new way for engineers to design mobile diagnostics. Such devices have a high level of adaptability for a variety of tasks, thereby reducing the requirements for data collection tools, since they generally do not have the task of processing them. In [3-4] the directions of wireless technology application in devices of non-destructive testing are considered.

The prerequisite for writing the article was the need to test digital signal processing algorithms when creating a mobile application for a pre-designed acoustic diagnostic device with wireless data technology [5-6].

**Ultrasound signal simulation.** In order to create a mathematical model of an ultrasound signal it is necessary to understand the processes and physical phenomena that occur in the wave propagation environment. The purpose of the model construction is to predict the result of the testing, reproduce the various testing situations and determine the optimal correction coefficients for real measurements.

In order for the model to be adequate, the values that will be used in the model completely replicate the real values that were taken from the experiment [6].

The signal modeling is divided into two stages: the reproduction of the excitation signal and the echo pulse signal from the flat-bottom reflector.

The first component of the model - the excitation signals are a damping harmonic oscillations. They occur due to reverberations and exponential oscillation damping on the transducer. The time during which the converter returns to equilibrium state is quite critical when performing the testing, as echo can be lost against its background. Reducing the duration of signal attenuation is achieved by damping the transducer, which increases its quality.

$$y = A \cdot \cos(2\pi ft - \varphi_1) \cdot e^{-\delta t} \quad (1)$$

where  $\varphi_1$  – initial phase shift;  $\delta$  – attenuation factor [ $Pp/m$ ],

The value of the attenuation factor depends on many factors (acoustic impedance of the material, porosity, graininess, extraneous inclusions, etc.) This parameter is chosen based on the experimental values of the amplitude or pressure at two points ( $x_1, x_2$ ):

$$\delta_p = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \ln \left( \frac{P(x_2)}{P(x_1)} \right) \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] \quad (2)$$

It is necessary to take into account the fact that the first period of the signal has full amplitude, since the converter receives energy from the power source, and the signal begins to fade only after the completion of the shock pulse formation (Fig. 1).

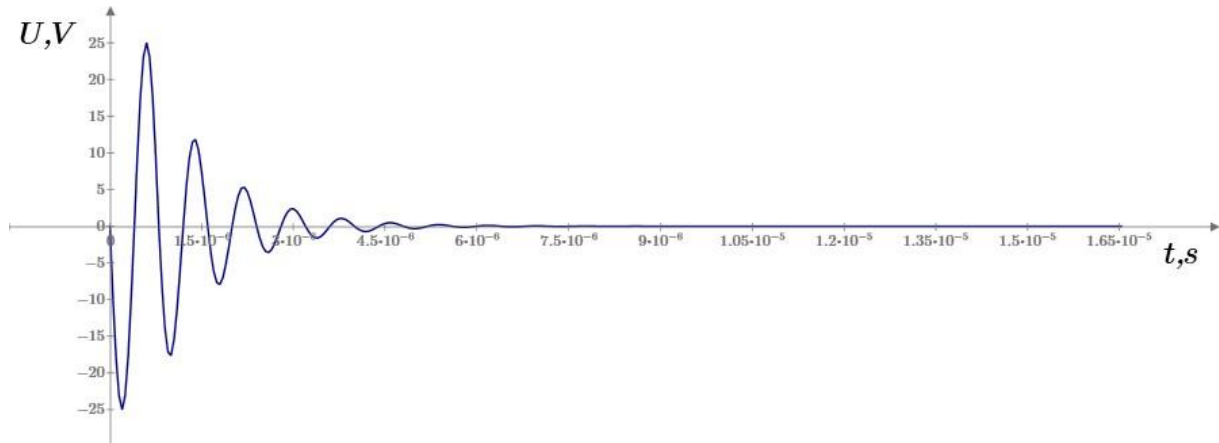


Figure 1. Model of damping harmonic oscillations

The second stage is to simulate the echo pulse. In most cases, the echo pulse is a sinusoidal signal of three periods, the frequency of the signal is equal to the frequency of the excitation pulse, but in phase the signal will be shifted by  $\pi / 2$ . This is due to the fact that at the boundary of two materials, the reflected signal loses half of the period. As well as the excitation pulse, the echo pulse has an attenuation factor due to energy dissipation (Fig. 2).

$$y = A \cdot k \cdot \cos \left( 2\pi f t - \varphi 2 - \frac{\pi}{2} \right) \cdot e^{-(t-s)^2} \cdot e^{-\delta t} \quad (3)$$

where:  $S$  - value of the displacement of the echo pulse relative to the beginning of the reference;  $k$  - transformation factor.

The displacement of the echo pulse simulates the depth of the flat-bottomed reflector. Transformation factor characterizes the fraction of the excitation pulse energy that has been converted into an acoustic wave. The value of the bottom factor depends on many factors (the density of the transducer to the surface, the quality of adhesion, the roughness of the surface of the object of control, etc.) so it should be set based on the results of the experiment.

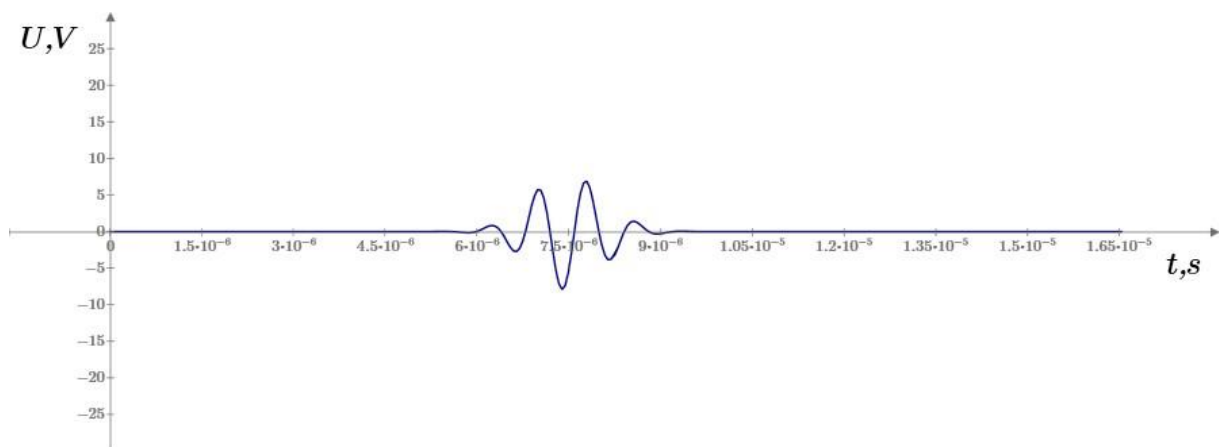


Figure 2. Model of the echo pulse

As a result of the addition of both components, we obtain an acoustic signal model in the form of an A-scan (Fig. 3). The figure shows how the coefficients of the individual

components are distributed. For visual observation, the echo pulse appears three times in the image, demonstrating three different depths of flat-bottom reflector.

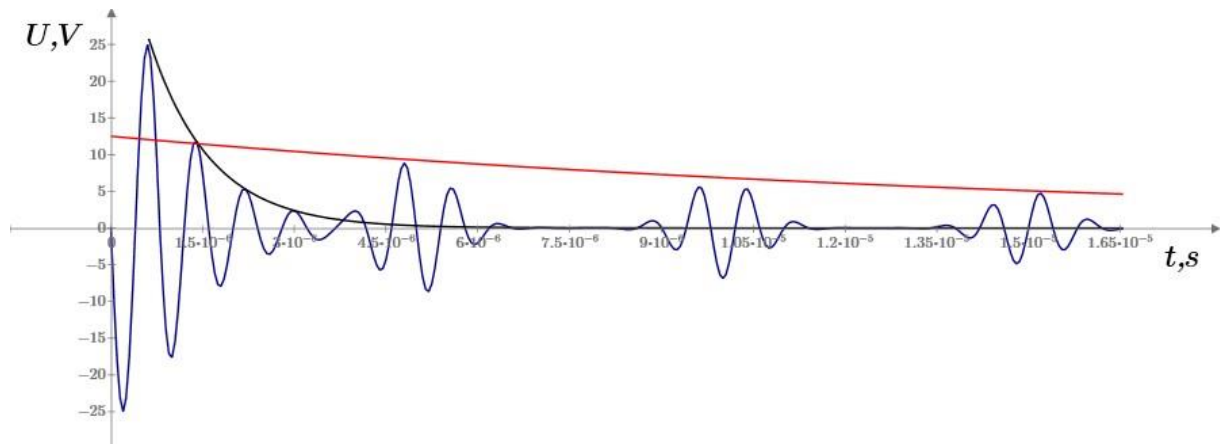


Figure 3. Signal model

The last component is the noise parameters that can be added to the basic equation to simulate the impact of various digital filtering algorithms.

**Application example.** Figure 4 reproduces the results obtained by scanning a 7.5 mm thick steel piezoelectric sensor with a resonant frequency of 1.25 MHz. The point coordinates for plotting were taken with the use of a 12-bit ADC with a sampling rate of 20 MHz. Noise with a maximum amplitude of 0.25 V is added to the total signal.

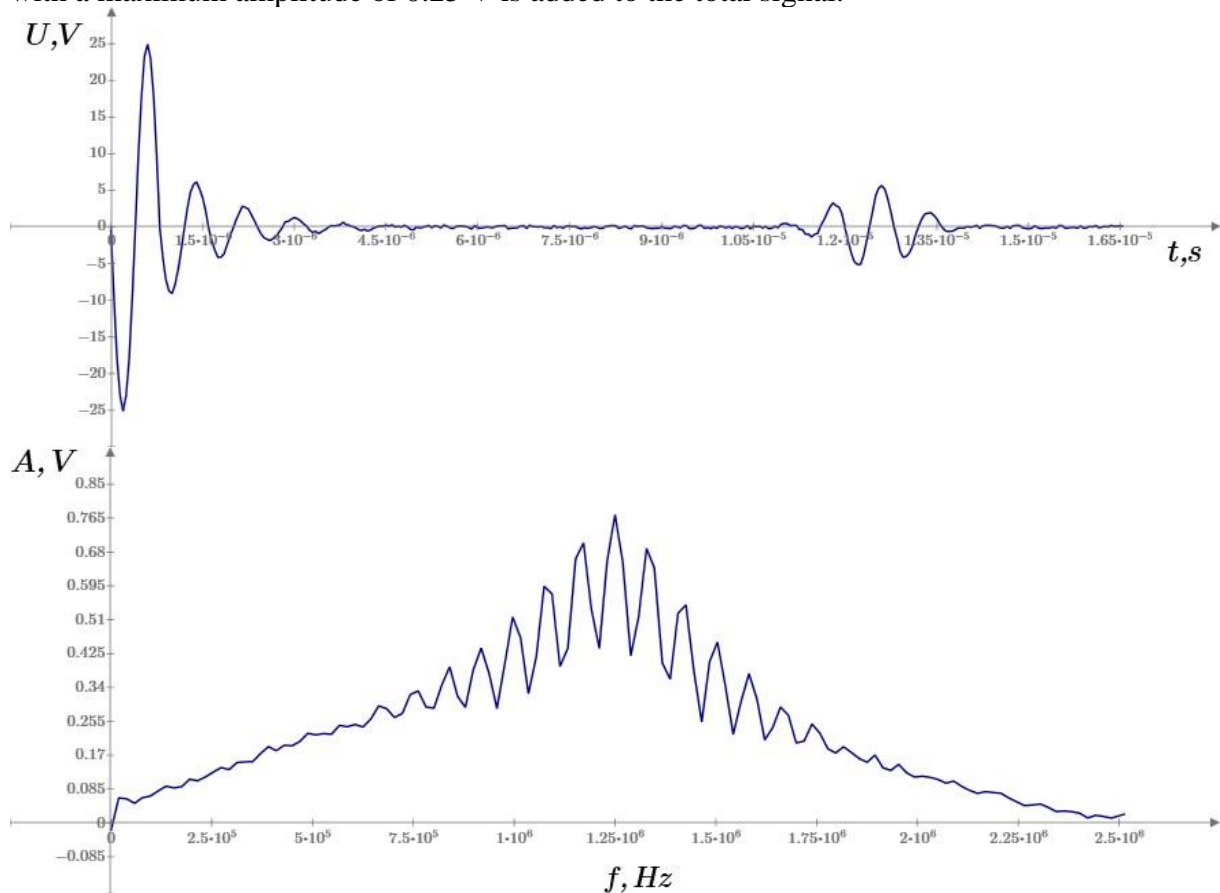


Figure 4. Signal decomposition in the Fourier series

For the proposed model, a fast Fourier transform algorithm was applied to determine the width of the signal spectrum. The graph below clearly shows how distorted the spectral picture is with respect to the main frequency of the signal.

**Conclusions.** The mathematical model described can be used to reproduce the results of acoustic diagnostics measurements. The simulation results will help to identify the optimal scan modes, data processing algorithms and set correction coefficients in real systems.

#### References:

1. *Неразрушающий контроль: справ. : В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И. Метод акустической эмиссии / В. И. Иванов, И. Э. Власов; Кн. 2: Балицкий Ф. Я. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 829 с.*
2. *Ермолов И. Н. Расчёты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справ.) / И. Н. Ермолов, А. Х. Вовилкин, В. Г. Бадалян. – М. : ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2004. – 108 с.*
3. *Petrik, V. Using wireless data transmission in eddy current nondestructive testing / Valentin Petrik, Anatoliy Protasov, Kostiantyn Syeryu, Iuliia Lysenko // Приборостроение - 2017 : материалы 10-й Международной научно -технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. - Минск : БИТУ, 2017. - С. 74-76.*
4. *Petryk, V. Ultrasound Flaw Detector Based on a Mobile Phone / Valentyn Petryk, Anatolii Protasov // CUTTING-EDGE SCIENCE – 2019 : materials of the International XV scientific and practical conference, Sheffield, April 30–May 7, 2019. – Sheffield: «Science and education» LTD, 2019. – Volume 14. – P. 64–66.*
5. *Повшенко, О. А. Мобільний ультразвуковий дефектоскоп / О. А. Повшенко // XI Науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2018 р., м. Київ, Україна : збірник статей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : Центр учбової літератури, 2018. – С. 449–452.*
6. *Povshenko, O. Portable Ultrasound Flaw Detector / O. Povshenko, V. Petryk, A. Protasov // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі: матеріали 2-гої науково-технічної конференції, Польща, м. Люблін, 15-19 жовтня 2018 року. - Люблін, Польща, 2018.- С. 34-36.*

III науково-технічна конференція “НК в контексті асоційованого членства України в ЄС”  
17-19 вересня 2019 року, м. Київ, Україна

Електронне видання

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ  
В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ  
В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ**

МАТЕРІАЛИ

3-ої науково-технічної конференції  
з міжнародною участю  
(Київ, Україна, 17 – 19 вересня 2019 року)

Редакторська група: *Лисенко Ю.Ю., Лашко О.В.*