



Українське товариство
неруйнівного контролю та технічної діагностики



Кафедра приладів і систем
неруйнівного контролю
КПІ ім. Ігоря Сікорського

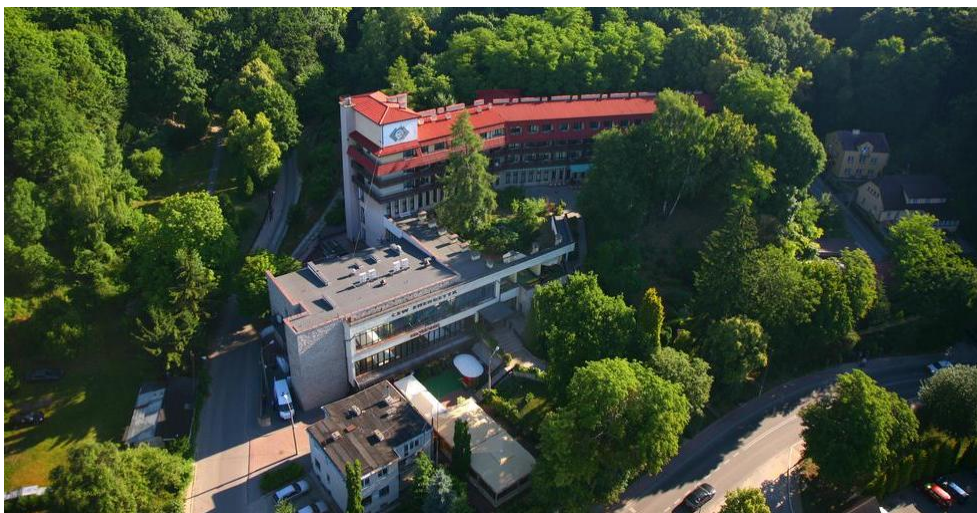
DPмест

Навчальний центр з
неруйнівного контролю

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

МАТЕРІАЛИ

2-гої науково-технічної конференції
з міжнародною участю
15 – 19 жовтня 2018 року



Люблін, Польща
2018



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

2-nd scientific conference with international participation
October 15 – 19, 2018



Lublin, Poland
2018

Збірник доповідей 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, – 52 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 2018): Conference proceedings / Lublin, Poland: USNDT, – 2018 – №2, – 52 c.

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;

Podubchenko 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>Галаган Р.М.</i> ДОСВІД РОБОТИ ГУРТКА «РОБОТОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ» НА КАФЕДРІ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ | 7 |
| <i>Муравьёв А.В.</i> ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСПЛЕЙНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ ... | 10 |
| <i>Учанін В.М., Мінаков С.М.</i> НОВИЙ СПОСІБ ОТРИМАННЯ МІРИ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ..... | 12 |
| <i>Овчарук С.А., Баженов В.Г.</i> ПОТЕНЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОСМІСНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В СФЕРІ ЦИВІЛЬНОГО РОЗМІНУВАННЯ..... | 16 |
| <i>Uchanin V., Nardoni G.</i> POSSIBLE WAY TO INCREASE THE EDDY CURRENT INSPECTION PRODUCTIVITY | 20 |
| <i>Момот А.С.</i> НЕЙРОМЕРЕЖЕВА СИСТЕМА ТЕПЛОВОЇ ДЕФЕКТОМЕТРІЇ..... | 23 |
| <i>Лашко О.В.</i> ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГІЧНОГО СУПРОВОДУ В ОРГАНІЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНИХ ЗАНЯТЬ ДЛЯ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ..... | 27 |
| <i>Kuts Y., Maievskyi S., Protasov A., Lysenko I., Dugin O.</i> USING OF PARAMETRIC TRANSDUCERS IN PULSED EDDY CURRENT TESTING | 30 |
| <i>Povshenko O., Petryk V., Protasov A.</i> PORTABLE ULTRASOUND FLAW DETECTOR | 34 |
| <i>Protasov A.</i> PROBLEMS OF TRAINING NDT SPECIALISTS IN UKRAINE | 37 |
| <i>Казеннов Н.П., Павлій А.В., Юрьев М.В.</i> ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ РАДИОГРАФИИ (RTC)..... | 41 |

Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В. МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТАМОДЕЛЕЙ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ СУРОГАТНОГО СИНТЕЗУ 47

Сторчак А.В., Тичков В.В., Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ В ПРОБЛЕМІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБ’ЄКТІВ КОНТРОЛЮ ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ..... 50

ДОСВІД РОБОТИ ГУРТКА «РОБОТОТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ» НА КАФЕДРІ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Р.М. Галаган

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

Сучасний розвиток промисловості ставить нові вимоги перед спеціалістами приладобудівної галузі. Пріоритетним напрямком розвитку наразі є автоматизація та роботизація всіх виробничих процесів. Згідно з прогнозами Міжнародної федерації робототехніки (International Federation of Robotics, IFR) до 2019 року понад 1,4 мільйона нових промислових роботів будуть встановлені на заводах по всьому світу [1]. І цей процес буде тільки прискорюватись.

Засоби неруйнівного контролю і діагностики з одного боку є складовими приладобудівного напрямку, а з іншого – з їхньою допомогою забезпечується якість іншої продукції (в т.ч. нових розроблених приладів) та автоматизація процесу виробництва. Сьогодні важко уявити собі якусь галузь світової економіки, яка б не використовувала сучасні методи та прилади неруйнівного контролю. Розвиток приладів і систем неруйнівного контролю також пов'язаний із автоматизацією та роботизацією.

Важливою задачею є формування вже сьогодні у майбутнього фахівця з неруйнівного контролю і діагностики професійної компетенції, пов'язаної із розробкою робототехнічних засобів та систем автоматизації. Тому в рамках викладацької ініціативи на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю (ПСНК) КПІ ім. Ігоря Сікорського з 2018 року діє науковий гурток «Робототехніка та автоматизація» (рис. 1). Метою створення гуртка є підвищення якості підготовки та рівня технічної обізнаності бакалаврів та магістрів.



а) теоретичне заняття, б) воркшоп із паяння

Рис. 1. Робота гуртка: а) теоретичне заняття, б) воркшоп із паяння

Серед основних завдань гуртка можна виділити наступне:

- створення сприятливих умов для ефективної та науково-пізнавальної діяльності студентів;
- систематизація набутих студентами теоретичних знань у галузі автоматизації, робототехніки, мікропроцесорної техніки, програмування та використання їх у науково-пізнавальній діяльності;
- узагальнення, аналіз та презентація результатів власної науково-дослідницької діяльності студентів у ході підготовки публікацій, доповідей на наукових конференціях та семінарах;

- активізація творчих здібностей студентів при написанні наукових робіт, що визначає готовність до створення принципово нових ідей на базі якісної технічної освіти;
- накопичення студентами знань технічних, фізичних та математичних наук, безперервне підвищення їх інтелектуального рівня шляхом самоосвіти;
- забезпечення сприятливих умов для розвитку та організації дозвілля студентів, їх інтелектуального та культурного розвитку в студентському середовищі КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- підготовка студентської молоді до самостійної наукової діяльності.

В основі формування професійних компетентностей, які забезпечує гурток, лежать підходи та методики, запропоновані співробітниками кафедри ПСНК [2,3].

Відвідуючи гурток, студенти мають можливість на початках розробляти, складати і програмувати простих роботів з використанням платформи Arduino: роботи-автомобілі, роботи-маніпулятори, людиноподібні роботи тощо. З часом завдання ускладнюються з урахуванням специфіки навчання на кафедрі ПСНК. Таким чином студенти оволодівають навичками, які в майбутньому дозволять їм самостійно проектувати сучасні складні роботизовані пристрої (рис. 2).

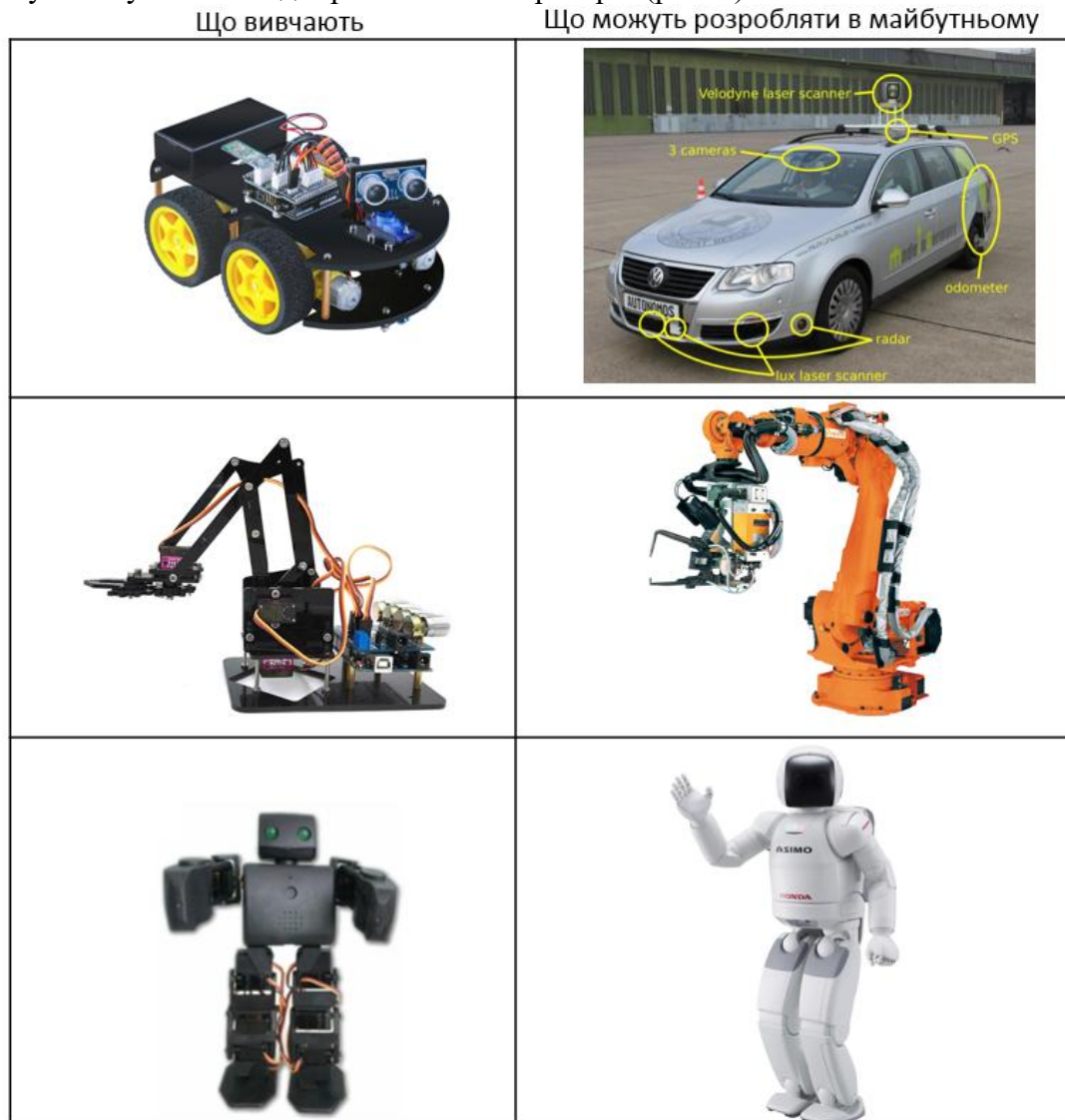


Рис. 2. Приклади роботизованих засобів, які вивчаються під час відвідування гуртка (лівий стовпчик) та які можуть бути спроектовані завдяки отриманим навичкам (правий стовпчик)

Досвід роботи гуртка показав, що студенти охоче відвідують гурток у позанавчальний час, оскільки їм цікавий сам напрямок робототехніки. Навряд чи така відвідуваність була б, наприклад, якби гурток був присвячений якомусь із методів неруйнівного контролю. З іншого боку сенсори, які використовуються у робототехнічних засобах, взаємодіють із фізичними полями (наприклад, ультразвуковими, оптичними, магнітними), що розглядаються при вивченні дисциплін, пов’язаних із різними методами неруйнівного контролю. Таким чином студент краще орієнтується в цих дисциплінах і розуміє їх прикладне застосування.

Робототехніка нерозривно пов’язана із програмуванням. Це ще один фактор, який впливає на зацікавленість студентів. Відвідуючи гурток, вони навчаються програмувати та створювати різні складні алгоритми для керування роботами. Ще один напрямок, який охоплює гурток, – це розробка електронних вузлів роботів та програмування мікроконтролерів, як базового елементу управління. Однак роботизована система – це не тільки електроніка і програмна частина; це також і механічні вузли. Тому студенти отримують навички розробки механічних вузлів роботизованих систем з використанням САПР SolidWorks. Більше того, студенти мають можливість не тільки створити 3D модель якогось вузла, а й надрукувати його за допомогою 3D принтера, що є на кафедрі ПСНК.

Таким чином, гурток акумулює в собі знання з різних дисциплін, які є важливими для формування професійних компетенцій майбутнього спеціаліста із неруйнівного контролю. Завдяки цьому студент цілісно сприймає систему професійно необхідних знань, якою майбутньому фахівцеві слід оволодіти на достатньо високому рівні під час навчання у вищому закладі освіти [4].

Підбиваючи підсумки, можна зазначити позитивний вплив гуртка на студентів та їх зацікавленість освітнім процесом. Робота гуртка ґрунтується на нових підходах та технологіях навчання, запропонованих викладачами кафедри ПСНК, що дозволяє перейти на більш якісний рівень підготовки спеціалістів з творчим мисленням та підвищити рівень їх фахової компетентності.

1. *World Robotics Report 2016 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-report-2016>.*

2. *Лашко О.В. До питань трансформації системи вищої технічної освіти. Довіра у процесі формування екологічного освітнього простору // Оновлення змісту, форм та методів навчання і виховання в закладах освіти: зб. наук. праць конф., 18-19 травня 2017 р., випуск 16 (59), Рівненський державний гуманітарний університет. - Рівне, 2017.*

3. *Протасов А.Г. Особливості професійної підготовки фахівців з неруйнівного контролю та технічної діагностики у вищому навчальному закладі // Проблеми інженерно-педагогічної освіти (Харків). - 2006. - №13. – С. 96-99.*

4. *Протасов А.Г. Шляхи підвищення конкурентоспроможності національних фахівців з неруйнівного контролю на міжнародному ринку праці // Збірник доповідей I-шої науково-технічної конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017» / Люблін, Польща: УТ НКТД, 2017 – 91 с.*

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСПЛЕЙНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

А. В. Муравьев

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Нанотехнологии являются междисциплинарной областью фундаментальной и прикладной науки и техники, которая имеет дело с совокупностью теоретического обоснования практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомарной структурой путем контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами. Практический аспект нанотехнологии содержит производство устройств или их компонентов, необходимых для создания, обработки и манипуляции атомами, молекулами и наночастицами, а также применение таких устройств на практике. Меньшие размеры микросхем и небольшая потребляемая мощность обуславливают более быструю обработку информации, а также большую вычислительную мощность.

В последние десятилетия значительные достижения в области физического материаловедения и физики твердого тела были связаны с созданием и использованием наносистем. По прогнозам, ряд многообещающих отраслей для применения наноматериалов включает в себя аэрокосмическую сферу, химическую и пищевую промышленность, транспортировку товаров, приборостроение. Нанотехнологии в первую очередь находят применение в системах записи информации, трансплантологии, при создании защитных покрытий высокой прочности и низкой степени окисления. К сожалению, современный уровень понимания основных физических явлений таких систем остается недостаточным для однозначных ответов и прикладного применения.

Одним из самых известных направлений применения наноматериалов в последние годы является использование серебряных нанопроводов для изготовления электропроводящего слоя сенсорных дисплеев, что позволяет значительно увеличить гибкость и прозрачность таких элементов, тем самым, увеличивая контрастность и сделав возможным создание закругленных дисплеев или даже таких, которые могут сворачиваться в рулон [1]. Такой проводник представляет собой нанопроволоку с практически бездефектной кристаллической решеткой, что обуславливает значительное увеличение прочности и практически полное отсутствие пластической деформации структуры. Эта технология стала основой так называемой «гибкой» электроники. В качестве альтернативной основы для получения монокристаллических нанопроводов используются частицы алюминия. Технология, у истоков которой стоят ученые из института Макса Планка, в недалекой перспективе позволит минимизировать размеры микрочипов и существенно повысить качество микроэлектроники за счет применения кремниевых нанопроводов диаметром около 40 нанометров.

Не менее значительным стало внедрение в промышленность OLED (дисплеи на органических и электролюминесцентных диодах), которая конструктивно напоминает квантовые дисплеи, состоящие из тонких органических пленок, расположенных между тонкопленочными проводниками [2]. Разработка основана на способности некоторых органических материалов излучать свет под действием электрического тока и получила широкое применение благодаря высокой технологичности производства, а, следовательно, более низкой стоимости по сравнению с технологией LCD.

В связи с прогрессом лазерных и светодиодных технологий [3] в последнее десятилетие получили качественный скачок в развитии HUD (Head-Up display) дисплеи - системы, позволяющие выводить информацию на прозрачные поверхности, которые находятся в фокусе поля зрения человека перед окружающими объектами, в виде дополнительного виртуального изображения. Впервые примененные в сфере военной авиации такие устройства с каждым днем получают все более широкое распространение в повседневной жизни благодаря основному их преимуществу - минимизации отвлекающих факторов. Классификация таких дисплеев происходит по типу используемого источника излучения, в качестве которого могут выступать ЭЛТ (электронно-лучевые трубки - технология, получившая начало в 1940 годах), современные светодиоды и лазеры [4]. Последние используются в устройствах, которые относят к категории проекционных или голографических систем, и позволяют реализовать визуальный вывод информации непосредственно на сетчатку глаза с целью дополнения сведений об окружающей обстановке.

Расширение номенклатуры искусственных углеродных наноматериалов и их аллотропных модификаций позволило качественно улучшить «твердотельную» микроэлектронику внедрением элементов, которые имеют высокую электропроводность и малую массу, таких как транзисторы, логические вентили и нанопровода. Применение углеродных нанотрубок в дисплеях с электронной эмиссией выведет их на принципиально новый уровень эволюции.

На данный момент наиболее важным является развитие технологий самоорганизующихся систем или искусственно организованных процессов, происходящих на атомно-молекулярном уровне, которые откроют доступ к синтезу новых наноструктур и получению объектов нанотехнологий в промышленных, а не единичных масштабах. Однако отсутствие необходимой измерительной техники значительно замедляет темпы внедрения в производство таких инноваций.

Дальнейшему развитию нанотехнологий способствует динамический анализ сфер и перспектив их применения, а также обеспечение современной метрологической, измерительной и инструментальной базами. Соблюдение этих условий создаст гарантии существования устойчивого рынка нанотехнологий.

Между тем оказывается, что уже более десятка лет человечество широко использует вполне реальные достижения нанотехнологий, присутствующие в сфере производства полупроводниковых приборов и микроэлектроники. Дальнейшая концентрация научных исследований в направлениях развития перспективных наноматериалов, таких как углеродные нанотрубки и серебряная нанопроволока, вскоре позволит вывести технологию производства дисплеев на уровень наноэлектроники и получить новые принципы формирования изображения.

1. Афонский А. А. *Электронные измерения в нанотехнологиях и в микроэлектронике* / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. – 2011. – С. 58-61.
2. Capelli R. et al. *Organic light-emitting transistors with an efficiency that outperforms the equivalent light-emitting diodes* // *Nature Materials*. – 2010. – № 9. – С. 496-503.
3. Морозов М. А. *Современная лазерная дальнометрия* / М. А. Морозов, А. В. Муравьев // *Новые направления развития приборостроения: материалы 9-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 20-22 апреля*. – Минск, Беларусь. – 2016. – 38 с.
4. 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.

НОВИЙ СПОСІБ ОТРИМАННЯ МІРИ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

В.М. Учанін¹, С.М. Мінаков²

¹*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів*

²*НТУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», м. Київ*

Вимірювання механічних напружень важливе для оцінювання технічного стану і прогнозування довговічності конструкцій. Це особливо важливо для зварних конструкцій через характерні залишкові напруження, викликані усадкою металу і фазовими змінами під час формування зварного шва [1, 2]. Існуючі методи вимірювання напружень в елементах конструкцій можна поділити на руйнівні і неруйнівні методи. До найпопулярніших відносяться механічні методи, побудовані вимірювання деформацій під час відокремлення частки матеріалу конструкції, наприклад метод отвору з тензометричними вимірюваннями поверхневих деформацій. Загалом, крім цього, відомо багато інших фізичних методів, серед яких на практиці найчастіше використовують рентгенівський, ультразвуковий, тензометричний, оптичні (голографічний і метод електронної спекл-інтерферометрії) і магнітні методи, кожен із яких має свої переваги і обмеження [3].

Значного поширення для визначення напруженого стану набули магнітні методи, побудовані на перебудові магнітних доменів під дією зворотного магнітострикційного ефекту (Віллари ефект) [4-6]. Ці методи, зазвичай, побудовано на залежності різних параметрів петлі гістерезису або шумів Баркгаузена від напружень. Магнітопружний і магнітоанізотропний (МА) способи визначення напруженого стану також використовують зворотний магнітострикційний ефект [6-10]. Останні роки, нами розвивається магнітоанізотропний метод, побудований на визначенні зміни анізотропії магнітних властивостей контрольованого матеріалу під дією механічних напружень [11-14]. В роботах [12-14] ми розглядаємо МА метод варіантом вихрострумowego методу, зважаючи на використання змінного електромагнітного поля, що дозволяє застосувати традиційні підходи, зокрема пов'язані з презентацією сигналу вихрострумowego перетворювача (ВСП). В цих роботах досліджено, зокрема, зміни сигналу спеціалізованого ВСП під дією механічних напружень розтягу і стиску, показано існування магнітно-механічного гістерезису, а також запропоновано нові оригінальні застосування МА методу.

Великою проблемою, що стримує розвиток неруйнівних методів вимірювання механічних напружень, є відсутність стандартних зразків (СЗ), які можна використовувати в якості міри механічних напружень для налаштування відповідних приладів. Без перебільшень можна сказати, що мова йде про створення принципово нової методології метрологічного забезпечення приладів вимірювання механічних напружень. Без цього, ефективно впровадження МА методу для вирішення актуальних задач технічного діагностування відповідальних об'єктів промисловості неможливо. В результаті поставлена задача створити технології виготовлення СЗ, яка могла би забезпечувати:

- виготовлення зразків із матеріалу об'єкту діагностування;
- формування механічних напружень різного знаку (розтягу або стиску) і різної величини;
- можливість вимірювання рівень механічних напружень в зразках прямими методами для їх метрологічного оцінювання і атестації.

Для створення технологій отримання мір механічних напружень запропоновано використати метод моделювання зварювальних процесів нагріванням локальних

ділянок пластин із прорізами до температури переходу матеріалу у пластичний стан [15]. На рис. 1 зображено заготовку для створення міри механічних напружень із листової сталі, де 1 – заготовка довжиною L і шириною B ; 2 – наскрізний проріз; 3 і 4 половини заготовки між прорізом і краєм; 5 – затискачі; 6 – прикладена сила розтягу. Заготовку 1 попередньо відпалюють для надання їй однорідності за структурними і магнітними властивостями, а також зменшення рівня можливих залишкових напружень. Далі за необхідності проводять хіміко-термічну обробку заготовки згідно штатної технології виготовлення контрольованого об’єкту. В середній зоні заготовки виконують наскрізний проріз 2 шириною наприклад 2 мм, який умовно поділяє заготовку на 2 частини (3 і 4 на рис. 1).

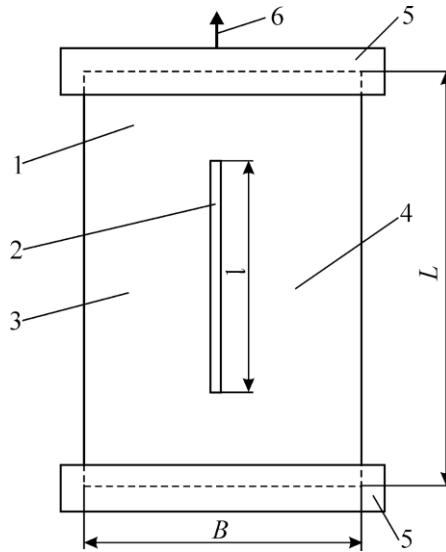


Рис. 1. Заготовка для виготовлення міри механічних напружень

В наведеному прикладі (рис. 1) частини заготовки виконані однаковими. Далі одну частину заготовки (наприклад 3 на рис. 1) між прорізом 2 і краєм заготовки нагрівають до температури переходу матеріалу в пластичний стан. Для сталі така температура складає 600°C . Нагрів частини 3 заготовки 1 із прорізом 2 можна проводити з однієї сторони заготовки за допомогою газового пальника. Можна вважати, що за умови короткого часу нагріву температура іншої частини 4 заготовки залишається незмінною завдячуючи існуванню прорізу 2, який перешкоджає розповсюдженню тепла. Контроль температури нагріву зручно здійснювати за допомогою цифрового пірометра (наприклад Raytec PM Plus). Під час нагріву частини заготовки матеріал в ній не може розширюватись через холодні частини заготовки, які перешкоджають її деформуванню. Для додаткового перешкодження деформуванню заготовки під час місцевого нагріву краї заготовки, що перпендикулярні прорізу, можна закріпити, наприклад, в затискачах 5 машини для механічних випробувань (на рис. 1 показано схематично). Через неможливість деформування в частині, що нагрівається, формуються напруження стиску. Внутрішні зусилля, що з’являються під час нагріву у частині 3 заготовки, будуть формувати у холодній частині 4 заготовки реактивні напруження розтягу. Такі напруження виникають через нерівномірний розподіл температури, якому сприяє наявність наскрізного прорізу 2. Під час охолодження від 600°C (умовна температура переходу в пластичний стан) матеріал в частині 3 заготовки переходить у пружний стан. Вільному укороченню частини 3 заготовки при її подальшому охолодженні перешкоджає частина 4 заготовки, яка не підлягала нагріву. Це призводить до формування в частині 3 заготовки залишкових напружень розтягу, які буду зростати в процесі подальшого охолодження. Під час охолодження будуть змінюватись також напруження в холодній частині 4 заготовки, в якій будуть формуватися залишкові напруження стиску. Процес зміни

механічних напружень σ в різних частинах зразка під час циклу нагрівання-охолодження показано на термомеханічній діаграмі (рис. 2). Тут: $0AB,DF$ – цикл зміни напружень в правій частині СЗ; $0A'B,D'F'$ – відповідний цикл для частини 4 СЗ.

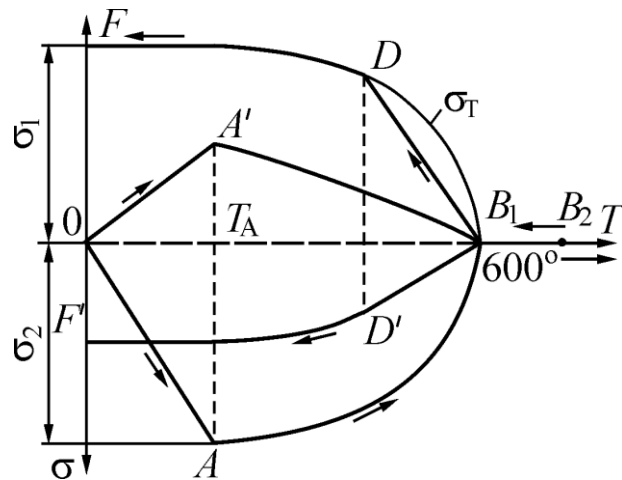


Рис. 2. Термомеханічна діаграма зміни напружень σ під час циклу нагрівання-охолодження.

Залишкові напруження різного знаку, що сформувалися у різних частинах заготовки внаслідок нагріву тільки однієї частини, будуть зберігатися в ній за умови відсутності зовнішніх сил. Схематично розподіл залишкових напружень по ширині зразка подано на рис. 3. Ці залишкові напруження можуть бути зняті тільки або термообробкою або розрізанням заготовки на окремі частини.

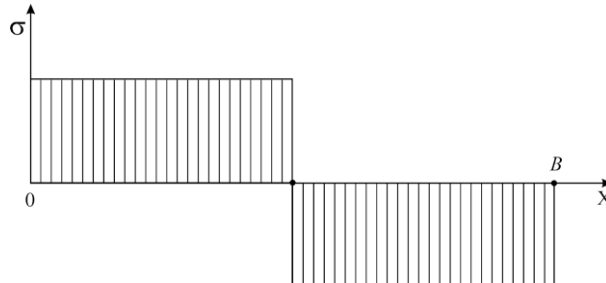


Рис. 3. Спрощена еюра розподілу механічних напружень σ по ширині СЗ.

Для формування залишкових напружень з різними значеннями заготовку з розрізом перед нагріванням до температури переходу матеріалу в пластичний стан попередньо можна розтягнути або стиснути у напрямку вздовж прорізу. Розглянемо випадок, коли до заготовки під час нагріву однієї частини в напрямку вздовж розрізу була прикладена сила P (6 на рис. 1). Під час нагріву попередньо розтягнутої заготовки залишкові напруження у її частинах будуть після охолодження меншими, ніж у заготовки, частина якої були нагріта без попереднього розтягу. І навпаки, при нагріві попередньо стиснутої заготовки залишкові напруження у її частинах будуть більшими, ніж у заготовки, частина якої були нагріта без попереднього стиску.

Локальні механічні напруження в крайніх половинах СЗ можна визначати після нагріву однієї половини до температури переходу матеріалу в пластичний стан і наступного охолодження шляхом вимірювання локальних деформацій матеріалу поверхні зразка методом свердлення отворів. Отримане значення напруження розтягу присвоюють частині СЗ, що підлягала нагріву, а отримане значення напруження стиску присвоюють частині заготовки, що не підлягала нагріву.

Висновок. Поданий спосіб отримання міри механічних напружень дозволяє відтворювати різний рівень механічних залишкових напружень розтягу і стискання в різних частинах СЗ, які можуть бути використані в якості міри механічних напружень для метрологічного забезпечення приладів для вимірювання рівня прикладених і залишкових механічних напружень. Відповідні прилади можуть будуватись на різних фізичних принципах, зокрема для їх створення можна використовувати вихрострумний або магнітний (зокрема, магнітопружний або магнітоанізотропний) методи НК.

1. Nitschke-Pagel T., Wohlfahrt H. *Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences* // *Material Science Forum*. – 2002. – Vol. 404-407. – P. 215–226.
2. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. *Теория сварочных деформаций и напряжений*. – М.: Машиностроение, 1984. – 279 с.
3. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. *Method of measuring residual stresses in components* // *Materials and Design*. – 2012. – 35. – P. 572–598.
4. Bulte D.P. Langman R.A. *Origins of magnetomechanical effect* // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2002. – 251. – P. 229–243.
5. Gur H., Erlan G., Bateglin C. *Investigating the Effect of Subsequent Weld Passes on Surface Residual Stresses in Steel Weldments by Magnetic Barkhausen Noise Technique* // *Materials Evaluation*. – 2016. – № 3. – P. 408–423.
6. Мехонцев Ю.Я. *О магнитных способах оценки внутренних напряжений* // *Дефектоскопия*. – 1966. – № 2. – С. 94–95.
7. Орехов Г.Т. *Определение остаточных сварочных напряжений магнитоупругим методом* / Г.Т. Орехов // *Автомат. сварка*. -1974. -N4. -С.30-32.
8. Abuki S., *Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation* // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1977. – Vol. 16. – № 7. – P. 1161–1170.
9. *Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor* / Yamada H., Uchiyama S., Takeuchi et all. // *IEE Transactions on Magnetics* // 1987. – Vol. Mag-23. – № 5. – P. 2422-2424.
10. Lo C.C.H. *Characterization of Residual Stresses in Ferrous Components by Magnetic Anisotropy Measurements Using a Hall Effect Sensor Array Probe* // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (Ed. D.O. Thompson). – 2011. – Vol. 30. – P. 1249–1255.
11. Пат. 100379 України, МПК G01L1/12, G01N27/72 / Спосіб комплексного електромагнітного контролю структурного і напружено-деформованого стану ферромагнітних матеріалів / Учанін В.М., Мінаков С.М., Остап О.П., Безлюдько Г.Я., Мінаков А.С. – Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.
12. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G., Ostash O., Bentoglio M. *Eddy current method for evaluation of stresses in steel components* // *Proceeding of 14th Intern. Conf. “Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”*, September 4-6, 2017, Bernardin, Slovenia. – P. 207-212.
13. Учанін В.М., Мінаков С.М. *Вплив механічних напружень на сигнал вихрострумного перетворювача магнітної анізотропії* // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2018. – № 1. – С. 21–25.
14. *Nondestructive Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method* // V. Uchanin, S. Minakov, G. Nardoni, O. Ostash, S. Fomichov // *Journal of Mechanical Engineering*, 2018 (в друці – www.ojs.sv-jme.eu).
15. Спосіб одержання міри механічних напружень для настроювання приладів технічного діагностування металевих конструкцій / В.М. Учанін, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков. Заявка № А2018 07299 від 07.06.18.

ПОТЕНЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В СФЕРІ ЦИВІЛЬНОГО РОЗМІНУВАННЯ

*Овчарук С.А., Баженов В.Г.,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ*

Анотація. У статті розглянуто сучасний стан проблеми розмінування вибухових зарядів та пристроїв з мінімальним або відсутнім вмістом металів, проаналізовано можливість та перспективи використання електроємнісного методу неруйнівного контролю як окремого або допоміжного методу для задач розмінування, проведено аналітичний огляд проведених та визначено проблематику наступних досліджень у цьому напрямку.

Вступ. На сьогодні гостро стоїть питання швидкого, безпечного та ефективного розмінування територій від наслідків бойових дій. Найбільш розповсюдженим інструментом для виявлення наземних мін є металодетектор. Однак моделі багатьох мін вироблені з мінімальним або нульовим використанням металу, що ускладнює або унеможливує їх детектування цим методом. Як альтернатива металодетекторам у таких випадках часто використовується технологія з використанням георадару (англ. GPR - Ground Penetrating Radar). Ця технологія полягає у випромінюванні електромагнітних хвиль високої частоти (одиниці гігагерц) та реєстрації відбитого сигналу. Даний метод дозволяє отримати результати сканування відносно високої точності, однак його недоліками є складність інтерпретації отриманих результатів, особливо результатів сканування приповерхневого шару без попередньої підготовки ґрунту, та значний вплив вологості та структури ґрунту на ефективність використання технології [1], [2].

Найбільш ефективними засобами розмінування вважаються комбіновані системи що працюють з використанням обох технологій - металодетектора та GPR [1], [2]. Такі системи здатні сканувати ґрунт за допомогою цих двох методів як одночасно так і окремо. Однак ті обмеження, що накладаються на використання GPR для знаходження вибухових пристроїв з відсутнім та малим вмістом металів, 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. Альтернативним або допоміжним до технології GPR для цих задач може стати електроємнісний метод.

Суть електроємнісного методу. Суть електроємнісного методу полягає у реєстрації зміни просторового розподілу електричного поля, що проходить крізь об'єкт контролю (ОК). Ці зміни визначаються шляхом вимірювання електричного заряду, що індукується цим полем на вимірювальному електроді перетворювача. Наявність нерівномірності в матеріалі ОК у вигляді певного об'єму (тіла) з діелектричною проникністю, що відрізняється від діелектричної проникності матеріалу ОК, викличуть зміни в просторовому розподілу поля, що в свою чергу спричинить зміну величини індукованого заряду на електроді перетворювача. Так як частота зміни поля мала (зазвичай до одиниць мегагерц), магнітною складовою поля можна знехтувати, тому таке поле називають квазі-електростатичним [3].

Електроємнісний перетворювач для одностороннього сканування має вигляд розгорнутого плоского конденсатора, між пластинами якого знаходиться ОК (рис. 1). Зміна сумарної діелектричної проникності середовища між пластинками цього конденсатора за рахунок наявності нерівномірності в зоні сканування може також

розглядатися як зміна електричної ємності конденсатора, тому метод називають електроємнісний (або просто ємнісним).

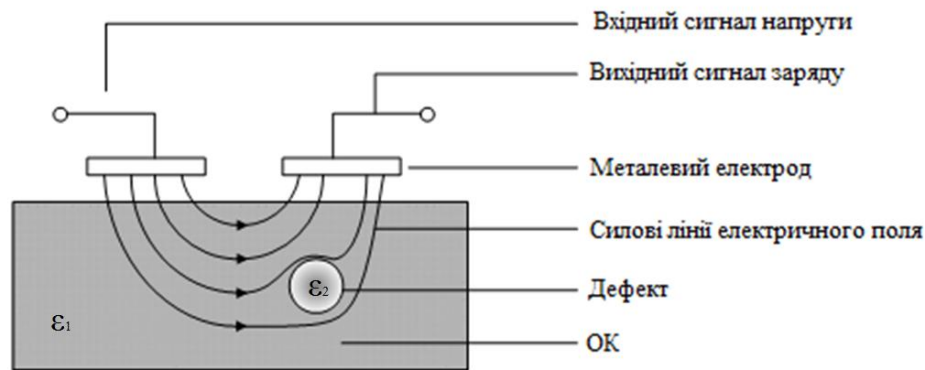


Рис. 1. Схематичне зображення процесу вимірювання електроємнісним методом

Таким чином, вимірюючи величину зміни індукованого електричного заряду на вимірювальній обкладці такого перетворювача можливо досліджувати ОК на наявність нерівномірностей (дефектів) у його структурі, однак лише якщо ці рівномірності характеризуються діелектричною проникністю, відмінною від матеріалу ОК. Для задач розмінування об'єктом контролю є ґрунт, а дефектами (нерівномірностями) є вибухові пристрої (міни).

Огляд стану проблеми та досліджень даного напрямку. Вперше метод одностороннього сканування електроємнісним перетворювачем в рамках неруйнівного контролю було розглянуто в роботі [3]. В цій роботі були описані принципи підходу, проведені перші експерименти зі сканування електропровідних та діелектричних зразків на наявність дефектів, зроблено висновки щодо можливих сфер застосування даного методу. Однак застосування даного методу для задач розмінування не розглядалося.

В дослідженні [4] проводиться ширший розгляд застосування плоских електроємнісних перетворювачів різної форми та конструкції для сканування ОК, виготовлених з декількох діелектричних матеріалів, включаючи композити та бетонні конструкції, та декількох електропровідних матеріалів – алюмінієва і сталеві пластини та сталеві труби. Також в цій роботі аналізується вплив на результати вимірювання дефектів різної форми та вплив форми та геометричних розмірів перетворювача і частоти сигналу на глибину виявлення дефекту. Дослідження проводились як експериментально так і зі застосуванням комп'ютерного моделювання для розрахунку розподілу електростатичного поля в ОК в залежності від типу перетворювача. Результати показують, що глибина виявлення дефекту не залежить від частоти сигналу, а лише від розмірів дефекту, конструкції перетворювача та діелектричних властивостей матеріалу ОК. Цікавим також в даній роботі є експерименти з дослідження можливості комбінувати електроємнісний перетворювач з вихрострумовим з роздільними котушками, вимірюючи ємність між цими котушками. Дане дослідження має ознайомчий характер з можливостями використання техніки ємнісного сканування (capacitive imaging) ОК, описують основні практики для отримання найліпших результатів сканування та обґрунтовують основні проблеми даного методу. Методології підвищення точності результатів вимірювання, систематизація характеристик впливу дефектів різного типу на результати вимірювання та дослідження можливості використання даного методу для цивільного розмінування не є частиною даних досліджень та пропонуються як тематика для наступних робіт.

Схожим на попереднє є дослідження [5], в якому було використано перетворювачі тієї ж форми, що і в [4], але з додатковим екрануванням. Сканування тут

проводилось для алюмінієвої пластини з поверхневими штучними дефектами та пластини з вуглецевого волокна з отворами. Додатково проводилось сканування металевої труби з корозією з метою вивчення впливу наявності корозії на результати сканування. У даному дослідженні так само як і у попередньому, не розглядалося питання застосування методу для розмінування.

В дослідженні [6] було розглянуто загальні проблеми розробки конструкції та розрахунку ефективності електроємнісного перетворювача, виділено 3 основні режими роботи перетворювача: режим передачі, режим шунта і одноелектродний режим. Для дефектоскопії використовуються режими передачі (принаймні 2 електроди - один випромінює, другий вимірює, ОК не заземлений) та шунта (режим передачі, але з заземленим ОК). Також в дослідженні були розглянуті перетворювачі різної форми та виконано порівняння їх чутливості шляхом моделювання розподілу електричного поля. Один із експериментів проводився з метою визначення найбільш чутливого режиму роботи перетворювача при виявленні електропровідного тіла у матеріалі ОК. У цьому експерименті об'єктом детектування слугувала мідна пластинка, занурена у клейку масу, сканування відбувалося з використанням перетворювача з електродами прямокутної форми. Згідно з результатами, найвища чутливість досягається з використанням режиму шунта. Використання методу для розмінування також не розглядалось.

Новий підхід до створення конструкції електроємнісного перетворювача розглянуто в роботі [7]. В даному дослідженні розроблено і запропоновано перетворювач у вигляді матриці електродів, по аналогії з методикою електроємнісної томографії (ЕСТ), для побудови 3D-зображення приповерхневої структури ОК. Такий підхід, згідно з результатами дослідження, дозволяє підвищити точність та глибину сканування шляхом проведення ряду почергових вимірів в одній точці сканування, змінюючи комбінацію пар скануючих електродів. Проте такий підхід також збільшує і час проведення одного сканування.

Наступне дослідження [8] базується на попередньому [7] і розглядає використання перетворювачів такого ж матричного типу але п'яти інших конструкцій. Метою цього дослідження є підвищення чутливості електроємнісного методу для задач розмінування. Як і у дослідженні [7], підвищення точності результатів сканування досягається завдяки проведенню вимірювання за різних комбінаціях електродів перетворювача в одній точці сканування. Однак у даній роботі не розглядається питання розрізнення конкретного типу виявленого об'єкта в залежності від його форми, глибини залягання та електричної провідності, а лише досліджується найбільш ефективна в плані чутливості конструкція перетворювача. Також у дослідженні не проводились експерименти, лише математичні моделювання.

Дослідження [9] є продовженням попередньої роботи. У цьому дослідженні були проведені експерименти з розробленим авторами комбінованим перетворювачем. Згідно з результатами експериментів, завдяки цьому перетворювачу авторам вдалося виявити пляшку з водою, закопану в піску на глибині 50 мм. Розміри самого перетворювача, що використовувався в цій роботі, складають 100 × 100 мм. Експерименти з предметами, закопаними в ґрунті в рамках цього дослідження не проводилися.

Висновки. Отже, розглянувши існуючі наукові роботи за даним напрямком, можна виділити завдання для наступних досліджень, які ще не були вирішені:

- 1) дослідження методів мінімізації обмежень, що накладаються на електроємнісний метод властивостями ґрунту (вологість, нерівність поверхні, і т.д.);
- 2) оцінка точності розрізнення конкретного типу виявленого об'єкта (міни) в залежності від його форми, розмірів, діелектричних характеристик матеріалів об'єкта, його орієнтації та глибини залягання;

3) дослідження використання диференціальної схеми вимірювання та відповідного алгоритму побудови зображення результатів сканування, вплив такого підходу на чутливість методу;

4) експериментальні дослідження впливу рослинного покриву, вологості та структури ґрунту на результати сканування електроємнісним методом;

5) дослідження обмежень використання електроємнісного методу у комбінації з георадаром (GPR).

[1] Cardona, L., Jimenez, J., Vanegas, N., (2013). *Landmine Detection Technologies to Face the Demining Problem in Antioquia*, Dyna, vol. 81, cc. 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] G. G. Diamond and D. A. Hutchins, (2006). *A new capacitive imaging technique for NDT*, Proceedings of European Conference on NDT, Berlin, Germany, pp. 1–8.

[4] X. Yin and D. A. Hutchins, (Jul. 2010). *Capacitive imaging technique for NDE*, presented in the 37th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE) conference, San Diego, US, 18-23.

[5] Liu, Z., Liu, H. (March 2017). *Experimenting Capacitive Sensing Technique for Structural Integrity Assessment*, Industrial Technology (ICIT) IEEE International conference, At Toronto, ON, Canada.

[6] Xiaohui Hu Wuqiang Yang, (2010). *Planar capacitive sensors – designs and applications*, Sensor Review, Vol. 30 Iss 1 pp. 24 – 39.

[7] Ye, Z., Banasiak, R. & Soleimani, M., (2013). *Planar array 3D electrical capacitive tomography*, Insight, 55(12), 675-680.

[8] 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.

[9] Tholin-Chittenden, C., Soleimani, M. (2017). *Planar Array Capacitive Imaging Sensor Design Optimisation*, IEEE Sensors Journal, 99, 1558-1748.

POSSIBLE WAY TO INCREASE THE EDDY CURRENT INSPECTION PRODUCTIVITY

V. Uchanin¹, G. Nardoni²

¹ Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences, Lviv

² I&T Nardoni Institute, Folzano, Brescia, Italy

Eddy current (EC) method is widely applied for inspection of semi-finished components (like forgings) for the purpose of the surface defect detection. The manual inspection of large forgings by EC method is time consuming due small size of probe needed for sensitive crack detection. In this case the EC probes with elongated sensitivity area are applied to increase the inspection productivity. But such probes don't secure the sensitivity requirements assurance due low performance characteristic. Best productivity can be achieved by application of the multiplexing inspection systems based on array type probes. But such systems are expensive enough and difficult in recalibration for different size forgings.

Special EDDYLINE type EC probe was developed to increase EC inspection productivity. EDDYLINE type EC One-Channel Array probe consists of 5 separate EC probes connected by specially developed matching unit to summarize the signal responses of each separate EC probe for operation with one channel flaw detector [1]. All separate EC probes are realized by double differential scheme for better noise suppression [2]. Each of these probes is installed inside the 12 mm diameter cylindrical aluminum case. Due such connection high sensitivity length (near 60 mm) was created. At the same time high spatial resolution was provided because each of EC probes is operated separately with the same sensitivity as before connection.

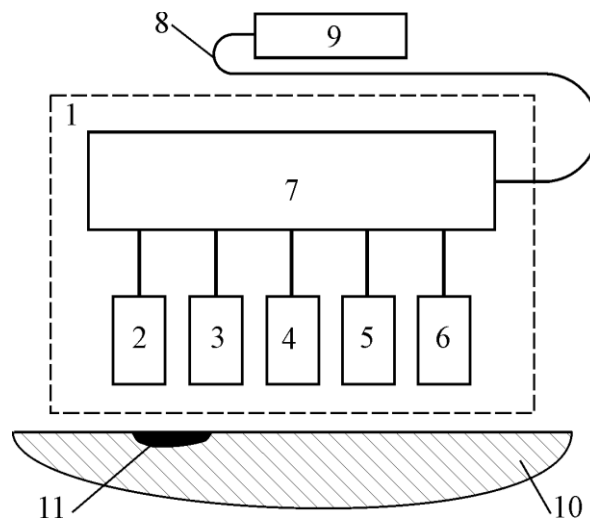


Fig. 1. The scheme of EC inspection with EDDYLINE type EC probe.

1 – EDDYLINE type EC probe; 2-6 – double differential type EC probes; 7 – matching unit;
8 – connecting cable; 9 – flaw detector; 10 – inspected specimen; 11 – flaw.

The investigations were carried out with the application of the special reference standard specimen fabricated from ferrous steel 45 with smooth (A – Ra 1.25 μm) and rough (B – Rz 160 μm) surfaces (fig. 2). Surface roughness on the surface B is simulated in the form of the sawcut grid with sawcut pitch, thickness and depth 1.0; 0.5 and 0.16 mm respectively. The artificial electrical-discharge-machined slots were 0.1 mm wide 30 mm long with depth 0.1; 0.2; 0.5; 1.0 and 2.0 mm on the smooth surface A and 0.6; 1.5 and 3.0 mm on the rough surface B.

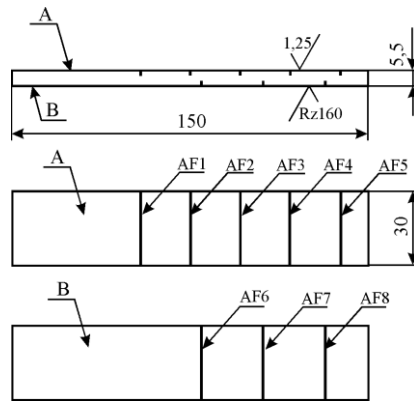


Fig. 2. Specimen for EDDYLINE type EC probe investigations.

All defects on both (A and B) surfaces in presented specimen were successfully detected with high signal to noise ratio. Let us consider the specificity of EDDYLINE type EC probe by the example of signals from shallowest 0.1 and 0.2 mm depth slots.

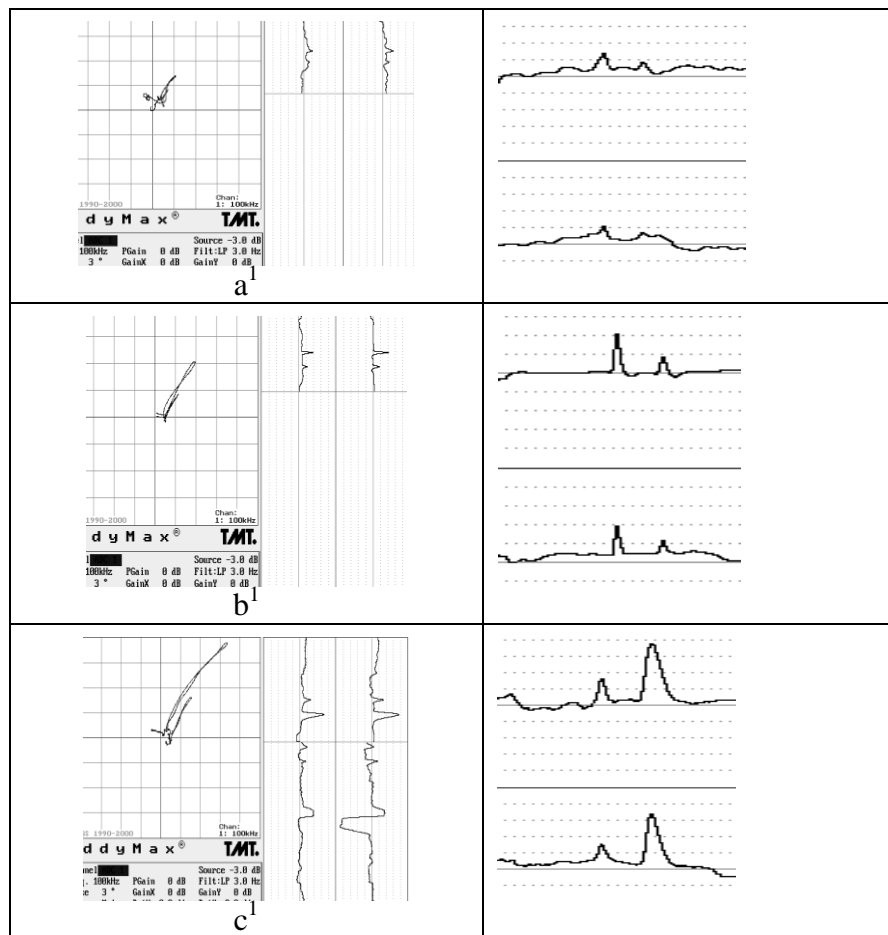


Fig. 3. EDDYLINE type EC probe signals in complex plane (a^1, b^1, c^1) and in time base mode (a^2, b^2, c^2) for one (a), two (b) and three (c) probes scanning across the shallowest 0.1 and 0.2 mm depth slots.

Fig. 3a show the signals of EDDYLINE type EC probe from shallowest 0.1 and 0.2 mm depth slots in situation when only one double differential type EC probe was scanned across the flaw area. At this time other 4 probes were situated out of specimen (in the air). Next picture (Fig. 3b) show the signals of the same slots when two double differential type EC probes were scanned across the flaw area simultaneously. And last picture (Fig. 3c) show the signals of the same slots when three double differential type EC probes were scanned across the flaw area at the same time.

So, each of additional probes scanned across the long crack increase the signal amplitude proportionally to the number of probes transferred across the flaw.

Fig. 4 shows the lift-off signal of EDDYLINE type EC probe in complex plane and in time-base mode for comparison. You can see the opposite direction of lift-off signal (Fig. 4) in comparison with signals from the flaws (Fig. 3)

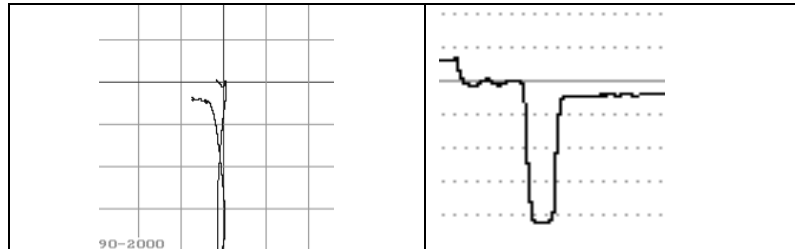


Fig. 4. Lift-off signals of EDDYLINE type probe in complex plane (left) and in time-base mode (right).

Special ferromagnetic and stainless steel specimens with 0.2; 0.3; 0.5; 1.0 and 2.0 mm depths electrodischarge slots were produced for calibration of the EDDYLINE type EC probe before inspection. Fig. 5 show the signals of EDDYLINE type EC probe from 0.2 and 0.5 mm depth slots in ferromagnetic steel specimen on the screen of ELOTEST B 300 flaw detector on operational frequency 200 kHz.

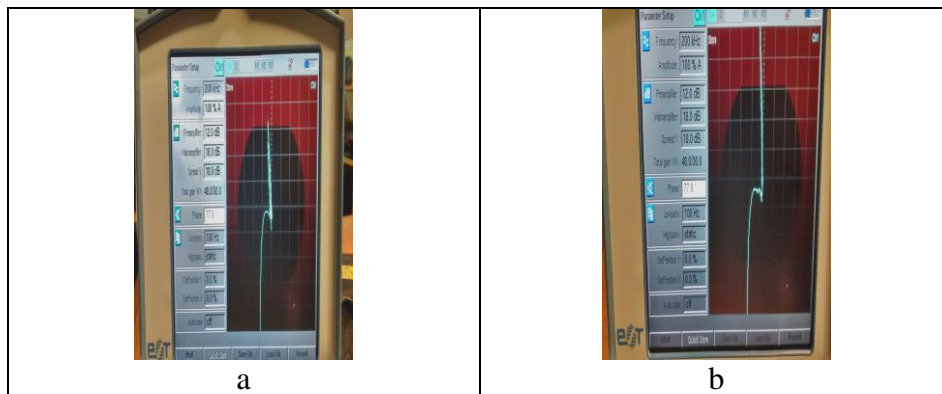


Fig. 5. Signals in complex plane obtained for 0.2 mm (a) and 0.5 mm (b) depths slots in ferromagnetic steel specimen (upward) and lift-off signal (downward).

Fig. 5 show the differentiation of flaw signals and lift-off by the hodograph direction. Such feature permits to improve the inspection reliability. EDDYLINE type EC probes were successfully applied for inspection of forgings in connection with ELOTEST B 300 flaw detector. Similar results were obtained with the signals of EDDYLINE type EC probe with 0.2 and 0.5 mm depth slots in stainless steel (nonferromagnetic) specimen on the operational frequency 610 kHz.

Conclusions. New EDDYLINE type EC one-channel **array** type probe was developed to increase the EC inspection productivity. Developed EC probes were successfully applied for detection of cracks in ferromagnetic and stainless steel tube forgings. Application of EDDYLINE type EC probes facilitates the increase in inspection productivity 4...5 times.

1. Uchanin V., Nardoni G., Nardoni P. et al. *New eddy current one-channel array probe for efficient inspection of tube forgings // Proc. of 14th Int. Conf. “Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”, Sept. 4-6, 2017, Bernardin, Slovenia. – P. 213-217.*

2. Uchanin V. *Surface double differential type eddy current probes, Lviv: Spolom. – 2013. – 268 p. (in Ukrainian).*

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА СИСТЕМА ТЕПЛОВОЇ ДЕФЕКТОМЕТРІЇ

А.С. Момот, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ

На сучасному етапі розвитку теплового неруйнівного контролю (НК) важливим напрямом досліджень є пошук або розробка методів цифрової обробки термограм. Така необхідність пояснюється тим, що отримані інфрачервоні зображення зазвичай містять високі рівні шумів. Завади можуть бути викликані нерівномірністю нагріву, складною внутрішньою структурою об’єкту контролю (ОК), недосконалістю вимірювальної апаратури та іншими факторами. Це призводить до спотворення теплових відбитків дефектів, що ускладнює визначення положення та форми виявлених аномалій. В багатьох випадках необхідно отримати інформацію не лише про розташування та поперечні розміри дефектів, а й визначити глибину їх залягання, товщину, побудувати теплові томограми. В умовах високої зашумленості вхідних даних та впливу на результат діагностики великої кількості взаємопов’язаних параметрів актуальним завданням є розробка автоматизованих систем теплового НК, які забезпечували б високу інформативність та достовірність контролю.

Визначення глибини залягання дефектів можливе за результатами проведення активного теплового контролю. Для аналізу динамічного теплового поля ОК під час процедури контролю з певною кадровою частотою записуються послідовності термограм. Температурні профілі в точках термограми будуть відрізнятися для дефектної і бездефектної ділянок. Аналізуючи форму, часові та фазові характеристики температурних профілів, роблять висновки щодо глибини залягання та розмірів дефектів. Оскільки температурні профілі є одномірними векторами, що містять піксельні значення температур в точках поверхні ОК, для їх опрацювання застосовуються методи цифрової обробки сигналів. В роботі [1] проведений порівняльний аналіз існуючих методів обробки термограм. В ході дослідження авторами встановлено переваги та недоліки методу вейвлет-перетворення і методу аналізу головних компонент, динамічної теплової томографії та нейронних мереж (НМ). В результаті встановлено, що алгоритми на базі нейронних мереж є найбільш оптимальними для застосування в складі автоматизованих систем активного теплового контролю. Це пояснюється високою адаптивністю НМ, їх здатністю працювати в умовах високих рівнів завад та ефективно вирішувати багатопараметрові нелінійні задачі [2]. В тепловому контролі нейронні мережі можуть бути використані для класифікації та побудови карт дефектів, а також в задачах теплової дефектометрії та томографії.

Основну інформацію про параметри та характеристики дефектів несуть не термограми, що є двовимірними цифровими зображеннями, а одновимірні температурні профілі. Зважаючи на простоту форми вхідних даних, в активному тепловому контролі доцільно використовувати нейронні мережі зворотного поширення похибки. Для навчання мережі на її входи подаються зразки теплових профілів дефектних та бездефектних точок, у відповідність яким ставиться певна характеристика дефекту. Характеристикою може бути тип або клас дефекту, глибина його залягання, товщина або будь-який інший параметр. Гнучкість та висока адаптивність НМ дозволяють вирішувати задачі, які на сьогоднішній день неможливо розв’язати традиційними статистичними або аналітичними методами. Наприклад, товщину (розкрив) дефектів в тепловому НК можна оцінити лише відносно [3]. Для цього порівнюють величину максимального диференційного температурного сигналу для дефектів, що залягають на однаковій глибині та мають однакову площу. Інші методи визначення товщини базуються на схожих принципах. Використання нейронних мереж дозволяє отримати конкретні числові значення товщини дефектів з точністю до одиниць відсотків.

Засобами програмного пакету NI LabVIEW було реалізовано алгоритми системи теплової дефектометрії. Передня панель віртуального приладу показана на рис.1. Ядром системи є три нейромережевих модулі. Кожен із модулів вирішує окрему задачу – визначення типу дефекту, визначення глибини залягання дефекту, визначення товщини дефекту. Зазначимо, що існує можливість використання однієї НМ для вирішення всіх перелічених задач одночасно. Однак, такий підхід є невиправданим, оскільки призводить до значного зростання складності структури мережі і помітного збільшення похибки та обчислювальних витрат. В усіх трьох модулях використовувалася нейронна мережа зворотного поширення похибки, побудована засобами набору інструментів NNtool програмного пакету MATLAB.

В якості вхідних даних система використовує масиви піксельних значень температур, які складаються з наборів температурних профілів у кожній точці термограми. В даному випадку, набір вхідних даних отримано за допомогою комп’ютерного моделювання активного теплового контролю алюмінієвої пластини розміром 100 x 100 мм та товщиною 10 мм. В середині пластини розміщені штучні моделі дефектів різного розміру, що залягають на різній глибині. Пластина нагрівалася тепловим потоком з густиною потужності 10 кВт, який було прикладено до лицьової грані пластини протягом 0,3 секунд. В результаті записано послідовність з 50 термограм роздільною здатністю 400 x 400 пікселів. Відповідно, кожен температурний профіль складається із 50 елементів. Моделювання виконувалось в програмному пакеті COMSOL Multiphysics.

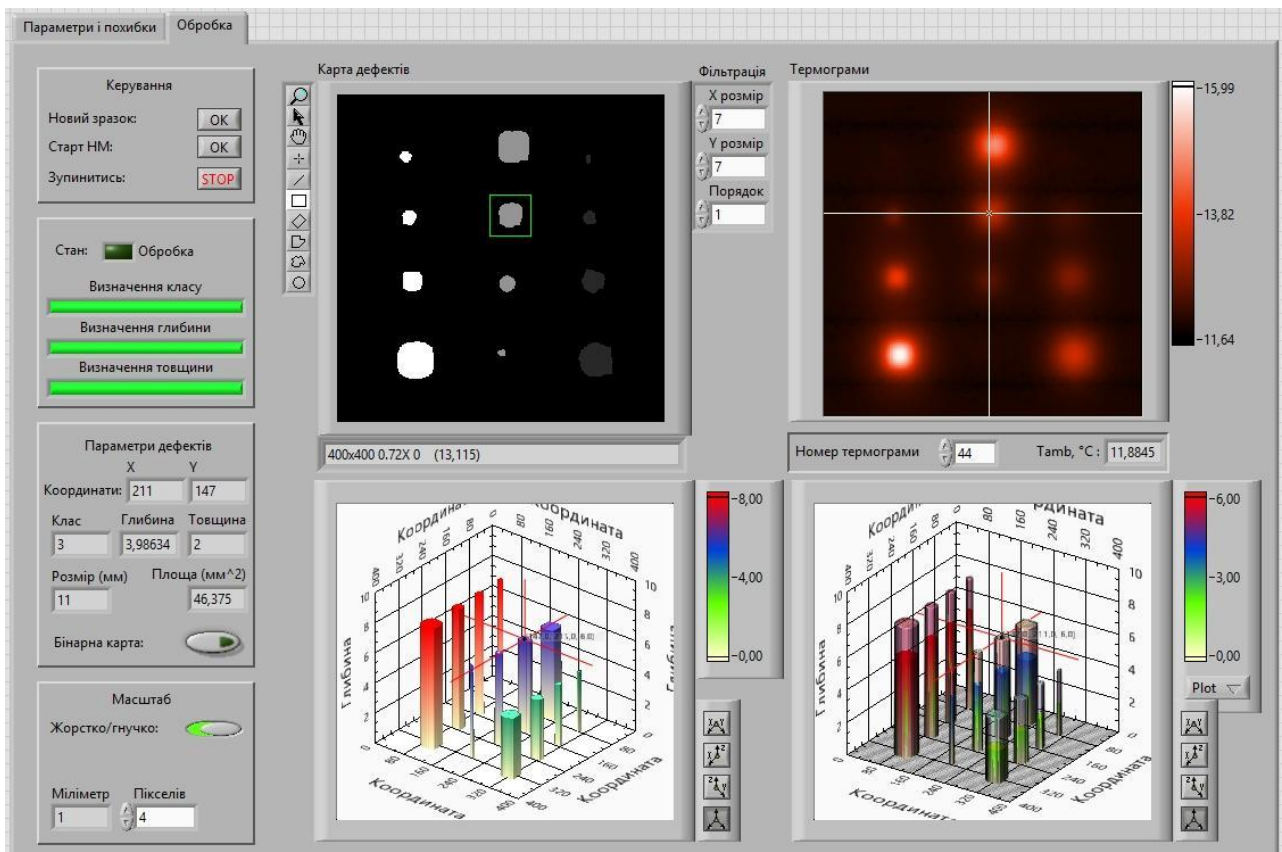


Рис. 1. Передня панель віртуального приладу системи теплової дефектометрії

Передня панель розробленої системи містить 4 графічних вікна, які містять зображення карти дефектів, початкових термограм та теплові томограми. Використовуючи відповідні інструменти для роботи з картою дефектів, існує можливість виміряти поперечні розміри та площу дефектів, визначити їх тип, глибину залягання та товщину. У вікні, що містить початкові термограми, передбачена

можливість виміряти надлишкову температуру в заданій точці. Теплова томограма містить зображення відбитків дефектів на відповідній глибині залягання. Знаючи товщину дефектів, можна відтворити їх форму в середині об’єкту контролю. На жаль, NI LabVIEW не надає засобів для створення повноцінного 3D зображення внутрішньої структури об’єкту. Тому зображеннями дефектів виступають напівпрозорі вершини стовпчиків на тепловій томограмі. Наявних інструментів та засобів достатньо, щоб в повній мірі вирішувати задачі теплової дефектометрії.

На рисунку 2 показано блок-діаграму одного із нейромережевих модулів. Синаптичні ваги, значення зміщень нейронів та інші параметри мережі імпортуються з текстового файлу. Алгоритм роботи мережі реалізовано у вигляді програмного коду мовою MATLAB. Для інтеграції коду в середовище NI LabVIEW використовується модуль MathScriptRT. Такий підхід дозволяє значно збільшити швидкодію всієї системи, оскільки графічна мова програмування G, що використовується в NI LabVIEW, є мовою високого рівня. Її заміна більш низькорівневою мовою пакету MATLAB призводить до помітного пришвидшення роботи за великих обсягів розрахунків.

Робота системи починається з імпорту та завантаження термограм, нейронних мереж та їх параметрів. Наступним кроком запускається робота НМ для визначення типу дефектів. На основі результатів її роботи будується карта дефектів. На даному етапі аналізуються всі точки термограми. Після визначення дефектних точок, в наступні модулі системи передаються лише відповідні вектори теплових профілів, що позитивно впливає на швидкодію. Для виявлених дефектних точок другим модулем визначається глибина залягання дефекту. За отриманими результатами будується теплова томограма. Останнім запускається в роботу модуль визначення товщини дефектів та побудови зображення внутрішньої структури ОК.

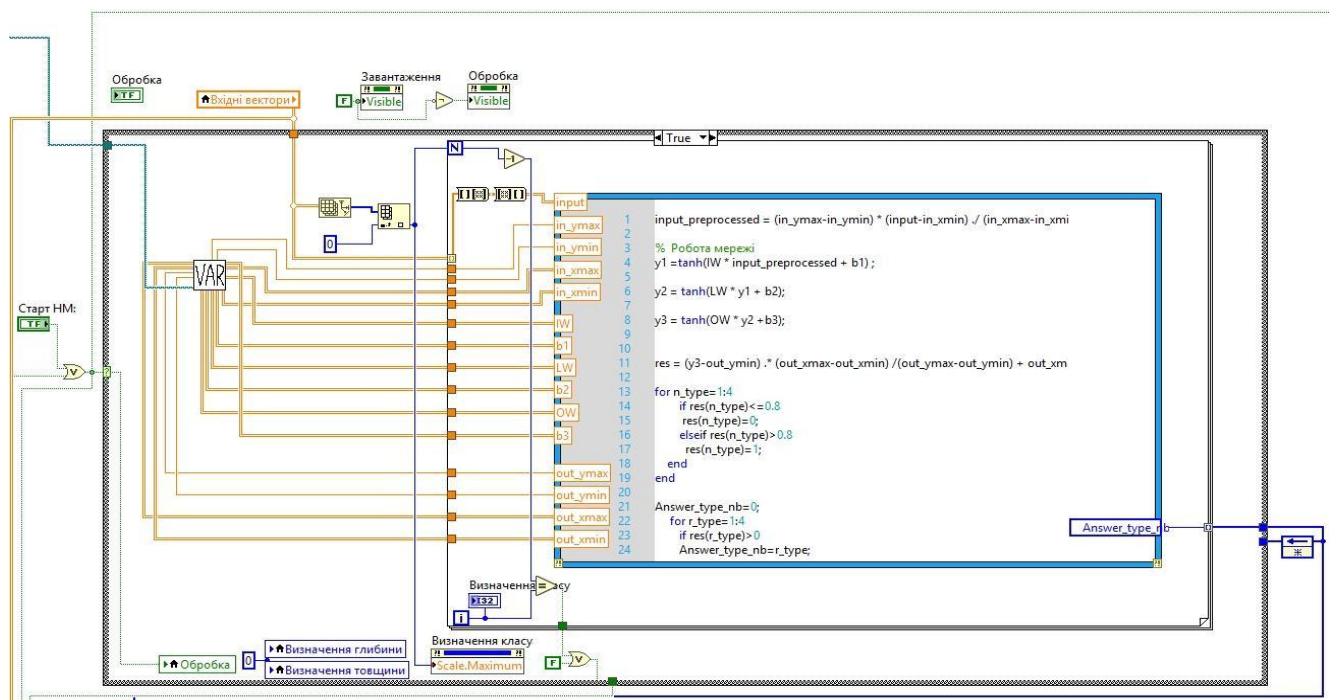


Рис. 2. Блок-діаграма модулю для роботи з НМ

Після завершення роботи НМ, всі нейромережеві модулі стають неактивними. На цьому етапі оператор має змогу опрацювати отримані результати. Розроблена система дозволяє отримати найбільш достовірні результати вимірювання глибини залягання та товщини дефектів у порівнянні з існуючими методами [4]. Значення середньоквадратичної похибки визначення характеристик дефектів наведені в таблиці 1. Похибка класифікації дефектів складає 31,2%. Це пояснюється тим, що значна

кількість пікселів були визначені як дефектні через вплив високого рівня теплової дифузії. За наведених умов контролю та параметрів ОК і дефектів уникнути високих спотворень форми теплових відбитків неможливо. Тому похибка визначення площі також має високий рівень. Значення критерію Танімото для даного дослідження склали 68,2%, що є непоганим результатом серед аналогічних досліджень [5].

Таблиця 1. Похибки вимірювання параметрів дефектів

| Параметр: | Площа | Глибина залягання | Товщина |
|--------------------------------------|-------|-------------------|---------|
| Середньоквадратична похибка (MSE), % | 46,6 | 0,1 | 0,49 |

Отже, розроблена система дозволяє проводити теплову дефектоскопію та дефектометрію з високою точністю. Застосування нейронних мереж в якості засобу обробки термограм призводить до підвищення достовірності контролю. Рекомендується використовувати дану систему для контролю однотипних виробів, що потребуватиме лише однократного навчання мереж. Контроль слід проводити в лабораторних умовах з метою зменшення впливу сторонніх факторів на його результати. В іншому випадку існуватиме необхідність формування значної за обсягом бази навчальних даних та ускладнення архітектури мереж, що негативним чином вплине на їх ефективність. Недоліком системи є значна залежність точності вимірювань від параметрів тепловізійної апаратури. Найбільш перспективним є застосування систем на базі НМ для контролю багатошарових та композиційних матеріалів у зв'язку зі складністю їх внутрішньої будови та наявності високих рівнів завад. Використання інтелектуальних систем обробки даних дозволяє зменшити роль оператора в прийнятті рішень, що позитивно впливає на достовірність результатів контролю. Основним завданням для подальших досліджень є пошук шляхів оптимізації системи з метою підвищення її швидкодії та можливостей роботи у реальному часі.

1. Галаган Р.М., Момот А.С. Аналіз методів цифрової обробки термограм // Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування. – Київ. – 2018. – № 55(1). – С. 108-117.

2. Vavilov V. P., Nesteruk D. A. Active thermal inspection of composite materials with the use of neural networks // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol.2011. – pp. 655–662.

3. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М: ИД Спектр, 2013. – 544 с.

4. Jiangang S. Analysis of data processing methods for pulsed thermal imaging characterisation of delaminations // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2013. Vol. 10. pp. 9–25.

5. Multivariate Infrared Signal Processing by Partial Least-Squares Thermography / F. López, V. Nicolau, X. Maldague, C. Ibarra-Castanedo // proc. VIIth IWASPNDE / F. López, V. Nicolau, X. Maldague, C. Ibarra-Castanedo. – Québec, Canada, 2013. – pp. 29–34.

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГІЧНОГО СУПРОВОДУ В ОРГАНІЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНИХ ЗАНЯТЬ ДЛЯ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ З ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ

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

Для сучасної системи вищої освіти характерний перехід від директивних форм організації педагогічної взаємодії до форм співпраці, діалогу, партнерства. З психолого-педагогічної точки зору недирективне управління навчальним процесом може бути реалізоване через екологічний психолого-педагогічний супровід, або екологічну психолого-педагогічну фасилітацію тих, хто навчається. Екологічна психологічна фасилітація (далі – екофасилітація) в процесі організації вищої професійної освіти передбачає дбайливе ставлення до внутрішньої психічної організації особистості того, хто навчається, тобто студента, та реалізується через психолого-педагогічний супровід останнього в його власному процесі самоорганізації, саморегуляції та професійного зростання з метою здобуття вищої професійної освіти.

Протягом останніх 20-ти років екофасилітація успішно застосовується для організації професійної підготовки та підвищення кваліфікації психологів, педагогів та представників інших допомагаючих професій [1], [2].

У [3], [4], [5] розглядаються можливості впровадження принципів сучасної практичної психології, а саме екопсихологічної фасилітації, в організації навчального процесу у технічному закладі вищої освіти. Зокрема, сформульовані ознаки екологічного освітнього простору, в якому студент як суб'єкт власного професійного розвитку має сприятливі умови для навчання та опанування професії. Далі, розширено у порівнянні з попередніми роботами, наведено ці ознаки. Отже, екологічному освітньому простору властиве розуміння того, що: 1) особистість студента – це відкрита динамічна система, що постійно розвивається і взаємодіє з ресурсами інших систем; залучення викладача – частина власної програми студента з саморозвитку для здобуття вищої професійної освіти; 2) у педагогічній взаємодії студент виступає суб'єктом: професійна діяльність викладача здійснюється у прямій взаємодії із студентом; 3) студент володіє всіма необхідними можливостями для ефективного навчання і зростання (усвідомлення профіциту можливостей студента); студенту притаманне суб'єктивне уявлення про власну траєкторію учбової діяльності, що визначається індивідуальними стратегіями саморозвитку; ці уявлення враховуються іншими учасниками освітнього процесу; 4) «викладач-студент» – єдина відкрита динамічна система; вони об'єднані загальною метою, яка полягає у розвитку професійних компетенцій один одного; у спільній педагогічній діяльності викладач і студент чинять взаємний вплив, що визначає умови взаємного зростання; 5) викладач активно прагне до взаєморозуміння із студентом: кожен з них вільний коригувати і погоджувати один з одним свою позицію; у педагогічній взаємодії є місце для взаємних конструктивних зауважень; педагогічна взаємодія базується на взаємній повазі, толерантності, довірі; 6) довіра до себе та до іншого як частин системи є невід'ємною умовою екологічної взаємодії; викладач довіряє собі як професіоналу та студенту як суб'єкту власної стратегії навчання, і навпаки: студент довіряє собі як суб'єкту власної стратегії навчання та викладачу як професіоналу.

Означені положення спираються на зміст принципу психологічної екологічності у недефіцитарній логіці, описаний автором методу екофасилітації професором П.В.

Лушиним [6]. Можливості їх практичного застосування у технічному закладі вищої освіти (далі – ЗВО) досліджувалися протягом останнього навчального року на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю КПІ імені Ігоря Сікорського. На нашу думку, орієнтація на вказані вище ознаки при організації підготовки інженерів з приладів і систем контролю та діагностики повинна призвести до створення сприятливих умов для професійного розвитку майбутніх фахівців. Дотримання принципів міжособистісної взаємодії у системі «викладач-студент», що витікають із запропонованого підходу, покликані сприяти гуманізації системи вищої технічної освіти, яка триває в останні роки та має на меті зміщення пріоритетів в освіті у бік розвитку творчої особистості та її гуманного світогляду [7].

Отже, нами була зроблена спроба дотримуватися означених принципів в організації комп'ютерних практикумів для студентів спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані технології і системи неруйнівного контролю та діагностики». На першому етапі даний підхід застосовувався в організації факультативу з курсу «Основи програмування» для студентів першого курсу навчання. Другим етапом стало впровадження підходу в організацію комп'ютерних практикумів з кредитного модулю «Спеціальні розділи математики. Чисельні методи» для студентів другого курсу. Заняття проводилися у формі групової екофасилітації з дотриманням основних принципів роботи психолога-екофасилітатора. Під час занять студенти самостійно обирали тему, завдання та методи їх опрацювання. Роль викладача при цьому зводилася до недиригентного психолого-педагогічного супроводу з дотриманням принципів екологізації педагогічної взаємодії; фактично викладач ставав частиною спільного процесу взаємодії, проблемної групи з вирішення поставлених задач.

Як результат, під час занять студенти проявляли значний рівень активності і самостійності. Відвідуваність занять була стабільно висока, не дивлячись на відсутність контролю з боку викладача. Студенти проявляли відповідальність при виборі тем для вивчення та способів їх опанування. Таким чином, можна припустити, що даний підхід дозволяє розподіляти відповідальність між викладачем і студентами за процес здобуття професійної освіти, сприяючи розвитку у студентів організованості з опанування професії.

Крім того, під час проведення практикумів спостерігалось посилення проявів ефектів самоорганізації всередині групи, скорочення активної участі викладача в процесі розв'язання задач: викладач виступав експертом лише з тих проблемних питань, відповіді на які не вдалося знайти всередині групи. В результаті розгортання динамічних групових процесів, як з педагогічної, так і з психологічної точки зору, групі вдавалося значно розширити варіативність способів розв'язку задач у порівнянні з групами, в яких заняття проводяться традиційними методами. В умовах екологізованої взаємодії всередині групи, де викладач виконував роль елемента системи, що екологізує взаємодію учасників, клімат у групі сприймався як більш безпечний, що, у свою чергу, сприяло саморозкриттю учасників та включенню більшої кількості студентів до обговорення проблемної задачі. Таким чином, студентами пропонувалися різні підходи до вирішення однієї і тієї ж задачі. Ці варіанти розв'язку також фіксував викладач: фіксація полягала у зосередженні уваги групи на запропонованому варіанті розв'язку, після чого студентам пропонувалося самостійно вибрати спосіб розв'язку задачі і порівняти отримані результати з результатами інших учасників. Отже, роль викладача у процесі зводиться до психолого-педагогічного супроводу, якому притаманне екологічне ставлення до внутрішньої психічної організації кожного учасника групи та динамічних групових процесів самоорганізації.

Слід зазначити, що, за результатами спостережень, при такому способі організації занять нерідко виникали ситуації «глухого кута», які були невід'ємною частиною взаємодії учасників з вирішення проблемного питання та спричиняли нові

витки групової активності. Таким чином, безперспективні на перший погляд ситуації ставали джерелом виникнення у студентів нових ідей і способів розв’язання задач.

Справедливо зауважити, що поряд з перевагами було виявлено низку проблем щодо застосування підходів екофасилітації в організації навчальних занять. Так, на нашу думку, через зменшення втручання викладача в процес розв’язання задач на практикумах у студентів може формуватися хибне уявлення щодо обізнаності викладача з предмету. На такі висновки нас наштовхнули результати анкетування, проведеного КПІ ім. Ігоря Сікорського. Щорічне анонімне анкетування демонструє оцінки студентів щодо певних аспектів педагогічної діяльності кожного викладача ЗВО. Серед них – рівень володіння предметом викладання. Ознайомившись з результатами оцінювання викладача, що брав участь в експерименті, у порівнянні з результатами опитувань попередніх років, ми виявили значне падіння рівня оцінок за цією позицією, отриманих від студентів експериментальної групи. Таким чином, ми припускаємо, що, надаючи перевагу самоорганізації групи, викладач може зіткнутися з подібною проблемою.

Крім того, виникли певні труднощі у поєднанні екофасилітативної ролі викладача та функцій викладача щодо контролю знань студентів. Запропонований підхід передбачає покладання на власні процеси самоорганізації студентів та їх відповідальність з опанування фаху, що передбачає або повну відсутність контролю з боку інших учасників освітнього процесу, або вироблення специфічних форм контролю. Оскільки сучасна система вищої освіти передбачає рейтингову систему оцінювання успішності студентів, то проблема інтеграції форми екологічного психолого-педагогічного супроводу у педагогічний процес при підготовці інженерів в сучасному ЗВО залишається невирішена. Поряд з тим, ми вважаємо впровадження запропонованих принципів формування екологічного освітнього простору при підготовці інженерів з приладів і систем контролю та діагностики перспективним і вартим подальших досліджень.

1. Лушин П.В. *Формирование нового образовательного пространства: из опыта инновационной работы* / П.В. Лушин // *Наука і освіта*, № 6-7. – 2004. – С. 3.

2. Лушин П.В. *Екологія образовательного пространства: профицитарный поход* / П.В. Лушин // *Післядипломна освіта в Україні*, № 1. – 2012. – С. 20.

3. Лашко О.В. *Екопсихологічні технології в організації освітнього процесу у технічному ВНЗ* / О.В. Лашко // *XVII Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи"*, 15-16 травня 2018 р. – Київ, 2018. – С. 145-146.

4. Лашко О.В. *Досвід застосування екопсихологічної фасилітації в організації навчальних занять у технічному ВНЗ* / О.В. Лашко // *III Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю "Психолого-педагогічний супровід професійної підготовки та підвищення кваліфікації фахівців в умовах трансформації освіти"*, 25 травня 2018 р. - Київ, 2018. - с. 10.

5. 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.

6. Лушин П.В. *Екологічна допомога личности в переходный период: экофасилитация* / П.В. Лушин // *Серия «Живая книга»*, Т. 2. – Киев: ТОВ «Оріяна», 2013. – с. 296.

7. Протасов А. Г. *Теоретико-методичні засади формування професійної компетентності майбутніх фахівців з неруйнівного контролю та технічної діагностики* : дис. докт. пед. наук : 13.00.04 - теорія і методика професійної освіти / Протасов Анатолій Георгійович – Київ, 2012. – 455 с.

USING OF PARAMETRIC TRANSDUCERS IN PULSED EDDY CURRENT TESTING

Y. Kuts, S. Maievskiy, A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin
*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Kyiv, Ukraine*

Introduction. Eddy current nondestructive testing (ECNDT) is one of the most common types of NDT, characterized by the simple interaction way of the testing object (TO) with the eddy current transducer (ECT), relatively low price, high efficiency, and reliability of the results. The current ECNDT development is focused on solving the tasks of improving the ECT, methods of excited eddy currents in the TO, developing new methods for processing information signals of the transducer, etc. [1, 2].

In the case of harmonic ECT excitation, the electrophysical characteristics of the materials and the geometric parameters of the TO are determined by the parameters of the ECT signals as amplitude, frequency and phase shift. The analysis of the ECT signals and the interpretation of the testing results are complicated by the action of a number of interfering factors, among which the most dangerous are the gap between the ECT and the TO, the variation of the material electromagnetic properties, the curvature and roughness of the TO surface, external and hardware noise and other. [1, 3].

Specialists from ECNDT periodically give attention to the idea of using ECT pulsed excitation, which has several advantages: increased depth of testing; additional informative parameters; the possibility of simultaneous analysis of the signal at several frequencies; the possibility of analyzing the ECT signal in the time domain [4, 5, 6].

In the practice of pulsed ECNDT, the following informative signals parameters are most often used: the variation of the time offset of crossing by signal of a certain level, the time slot certain nodal points, the peak values of amplitude and the surpassing the certain threshold values by the amplitude and times moments of these surpassing [7, 8, 9]. The disadvantage of such pulsed ECNDT implementations is the use of nodal points of the ECT signal. As result, there are the incomplete usage of signal information capabilities and difficulties in the exposure of the mentioned nodal points from the effects of noises. In this regard, the issues of increasing the informativity and accuracy of the ECNDT, based on the in-depth study of pulsed ECNDT, the search for new informational parameters and characteristics of ECT signals and the improvement of their analysis methods in ECNDT are very important.

The purpose of this paper is to analyze the informational parameters of the parametric ECT signals in the pulsed excitation mode in a case of testing the defects such as surface cracks.

The Structure of the Experimental Model. Fig. 1 shows the structure of the developed ECNDT system, which consists of the laid-on parametric ECT, generator (G), digital oscilloscope (DO), the digital interface (DI), personal computer (PC) with original algorithmic software (Soft). The algorithm of the software has provided the receiving ECT signals, obtaining the discrete amplitude and phase characteristics of the signals (ACS and PCS) by applying a discrete Hilbert transform (DHT) and analysis of obtained characteristics [10]. The usage of the DHT allows obtaining a large volume of data in a small time interval.

The pulse signal from the generator was transmitted to a parametric ECT ($U=5V$, pulse interval $T=5\mu s$, pulse duration $\tau=2\mu s$). ECT was connected to the measuring scheme, the output of which was formed the information signal of voltage. This signal has been considered as the reaction of the ECT to the front of the excitation pulse.

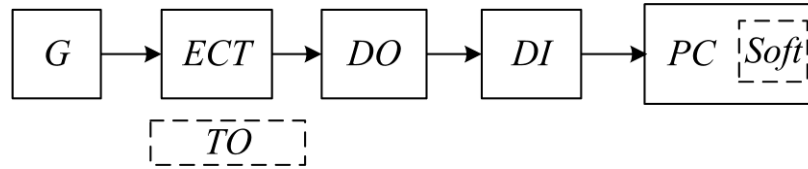


Fig. 1. Structure of the experimental setup

For experimental researches there were used the samples with a thickness of 5 mm, a length of 100 mm, a width of 30 mm. The sample S-1 is made of steel of St.20 ($\mu > 1$), and S-2 is made of aluminum alloy D16 ($\mu = 1$). There are three artificial defects imitating surface cracks, 0.2 mm in width and $h = \{0.2, 0.5, 1.0\}$ mm in depth on one of the samples surfaces.

Technique of Experimental Data Processing. The task was solved by experiments based on:

- researching the parametric laid-on ECT with pulsed excitation mode and the subsequent analysis of its signals in the time domain [11];
- detection and analysis of informational parameters of ECT signals such as damping decrement and oscillations frequency;
- the determination of the functional dependence of the ECT signal parameters on the TO characteristics.

The ECT signal model could be represented by an additive mixture of dumping harmonic oscillations and Gaussian noise:

$$u_{\text{ect}}(t, h) = A_m(h) \cdot e^{-\alpha(h)t} \cos(2\pi f(h) \cdot t) + u_n(t), \quad t \in (t_1, t_2), \quad (1)$$

where $A_m(h)$ – the amplitude value of the information component of the ECT signal, $\alpha(h)$ – damping decrement, $f(h)$ – frequency of the signal oscillations, t – current time, (t_1, t_2) – time interval for analysis of the ECT signal, $u_n(t)$ – the noise component of the signal, which was considered as the realization of a Gaussian random process with zero mathematical expectation and dispersion σ^2 .

The procedure for processing and analyzing the characteristics of the ECT signal obtained in pulsed excitation mode included the following steps:

- determination of the Hilbert-image of the sample capture $u_{\text{ect}}[j, h]$:

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

where j – the number of the ECT signal in the digital representation, \mathbf{H} – Hilbert-transform operator;

- determination of discrete ACS and PCS of ECT:

$$\Phi[j, h] = \arctg \frac{u_H[j, h]}{u_{\text{ect}}[j, h]} + \mathbf{L}(u_H[j, h], u_{\text{ect}}[j, h]), \quad (3)$$

$$U[j, h] = \sqrt{u_{\text{ect}}^2[j, h] + u_H^2[j, h]}, \quad (4)$$

where \mathbf{L} – the determination operator of PCS existing outside the unicity interval of the \arctan function.

- smoothing of function (3) using the method of obtaining the linear regression of Bartlett-Kenosis [12] and determining the oscillations frequency of ECT signals by the linear trend of obtained function:

$$f(h) = \Delta\Phi_L(\Delta T, h) / (2\pi\Delta T), \quad (5)$$

where $\Delta\Phi_L(\Delta T, h)$ – the phase of the ECT signal accumulated in time interval $\Delta T = t_2 - t_1$ and obtained by the function of linear regression;

- application of exponential approximation to function (4) to increase the accuracy of determining the damping decrement of the ECT signal and to determine it using equation:

$$\alpha(\bar{w}) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1', \bar{w})}{\hat{U}(t_2', \bar{w})}, \quad (6)$$

where $\hat{U}(t_1', \bar{w})$, $\hat{U}(t_2', \bar{w})$ – the value of approximation curves at time moment t_2' and t_1' , $\Delta T = t_2' - t_1'$;

– analysis of the obtained results by comparison with the calibration characteristic of the dependence of the measurable parameter TO from the informative parameter of the ECT signal;

– visualization of obtained results.

Results and discussions. The results of the analysis of the signal dumping in pulsed excitation mode of the ECT for the two samples are shown in Fig. 6 (curve 1 – is for S-1 sample; curve 2 – for S-2 sample). There is close to the linear the character of the received function dependence of the dumping of the ECT signal from the crack depth in TO. It has different values depending on the physical and mechanical characteristics of the TO material (including conductivity and magnetic permeability).

Comparative analysis of curves on Fig. 6 shows that such informative parameter like damping decrement can be used to testing and evaluate the crack depth in the TO. In the conducted experiments, the relative error of the determining the crack depth has not exceeded $\pm 0.5\%$, and the average sensitivity for S-1 and S-2 was $S_{\alpha, S1} = 0.2 \mu s^{-1}/mm$, $S_{\alpha, S2} = 0.1 \mu s^{-1}/mm$ respectively, that is higher for non-magnetic material.

The results of determining the change in the ECT signal frequency in pulsed excitation mode as functions of the crack depth in the specimen S-1 and S-2 is shown in Fig. 7a and Fig. 7b, respectively. The obtained curves of the dependence $f(h)$ are linear, and the values of the ECT signal frequency decrease with increasing the crack depth in both samples.

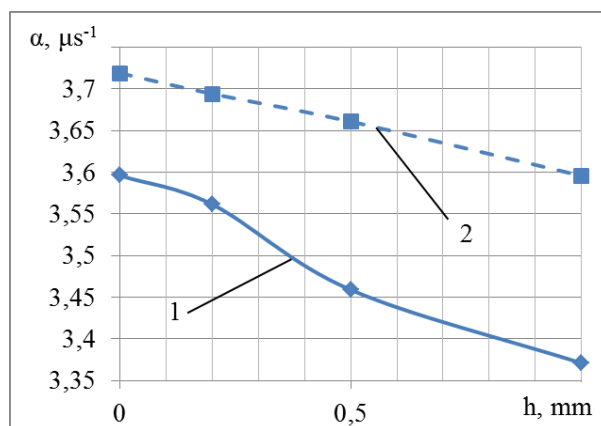


Fig. 2. ECT signal dumping variation

(curve 1 – for S-1; curve 2 – for S-2)

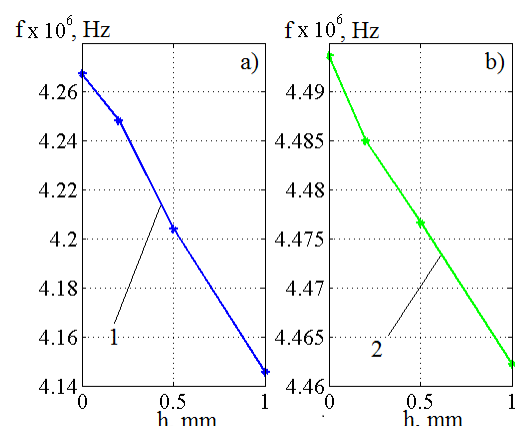


Fig.3. ECT signal frequency variation

Detailed analysis of the curves from Fig. 7 showed that in this case the relative error of determining the crack depth h does not exceed $\pm 2\%$, and the sensitivity to the crack depth h for S-1 with $\mu > 1$ ($S_{f, S1} = 0.12 \text{ MHz/mm}$) is much higher than for the S-2 with $\mu = 1$ ($S_{f, S2} = 0.03 \text{ MHz/mm}$).

The conducted researches have shown that in the case of using the parametric ECT in pulsed excitation mode for evaluation the crack depth in products made of magnetic materials, it is advisable to use as an informative parameter the signal frequency, and for products made of non-magnetic materials, the dumping of ECT signals.

Conclusions. It has been established that the signals of the parametric ECT that are obtained in pulsed excitation mode and have the form of damped harmonic oscillations can be used in the eddy current testing for estimating the depth of surface cracks. Also, it is established that in the pulsed mode of ECT excitation, the type of dependence of the dumping decrement and the oscillations frequency of this signal, from the change in the crack depth in the TO, is close to the linear one.

The provided experiments show that the change in the crack depth from 0 to 1 mm led to a relative change in the oscillations frequency of the transducer signal by $\approx 3\%$ and $\approx 0.7\%$ (for samples made of steel and aluminum, respectively) and the relative change in the dumping decrement - in 3.3% and 6.6% (for samples made of aluminum and steel, respectively). The error of determining the crack depth for mentioned samples did not exceed $\pm 2\%$.

The dependences of the damping decrement and the oscillations frequency of the signal from the crack depth indicated for the parametric laid-on ECT can be used for further researchers of this ECT type in order to evaluate the crack parameters in the surface and subsurface layer of the TO material with a dielectric coating.

The usage of the parametric type of the ECT in conjunction with the digital processing of information signals expands the capabilities of pulsed ECNDT. In particular, it allows realizing specific mode for estimating of surface cracks depth.

[1] Teterko A., Nazarchuk Z. *Selektyvna Vykhrostrumova Defektoskopija [Selective Eddy Current Non-Destructive Testing]*. Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Ukraine), 2004. – 247p.

[2] Bazhenov, V., Protasov, A., Gloinik, K. *Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer. MRRS 2017 - 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, Proceedings 8075051, p. 155-158.*

[3] Huang S., Wang S. *New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing. Singapore : Springer, 2016. – 222 p.*

[4] Johnson M. J. *Pulsed eddy-current measurements for materials characterization and flaw detection. The University of Surrey, Guildford, Surrey, UK, 1997 – 153p.*

[5] Дорофеев А.Л. *Измерения толщины покрытий с помощью вихревых токов / А.Л. Дорофеев, Г.А. Любашов, Ю.Я. Останин. – М.:Машиностроение, 1975. – 65 с.*

[6] Kuts Y. *Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // Materials Science. – 2016. – vol. 52, no. 3. - pp 431–437.*

[7] 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.*

[8] Thyagarajan K. *Pulsed Eddy Current Imaging of Corrosion Pits / K. Thyagarajan., B. Maxfield, K. Balasubramaniam, C.V. Krishnamurthy // J. Nondestructive Testing & Evaluation. – 2008. – Vol 7(2). – pp. 32–36.*

[9] Plotnikov Y. *Subsurface defect detection in metals with pulsed eddy current / Y. Plotnikov, W.J. Bantz // Review of Quantitative NDE. – 2005. – vol. 24. – pp. 447-454.*

[10] Lysenko I. *Using multidifferential transducer for pulsed eddy current object inspection / Y. Kuts; A. Protasov; I. Lysenko; O. Dugin; O. Bliznuk; V. Uchanin // IEEE 1st Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering. – 2017. – pp. 826-829.*

[11] Lysenko I. *Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing / Y Kuts, S Maievskiy, A Protasov, I Lysenko, O Dugin // 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2018. – pp. 594-597.*

[12] *Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net>.*

PORTABLE ULTRASOUND FLAW DETECTOR

Povshenko O., Petryk V., Protasov A.

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

The task of creating a portable device is solved in this paper. This device uses an ultrasonic method for defect detection and has a convenient and more efficient system for transmitting and processing information in comparison with the previously developed one.

A cable is commonly used when communicating between converter units and data processing. In cases where there is no direct access between them, it is a need for wireless data transmission. Such a method of transmission allows for the automation of the system and frees us from the physical connection of two or more parts of the device. The use of wireless communication for technical diagnostics with known methods of NDT is considered in the paper [1].

You can get acquainted with results of the use of wireless technology in the tasks of NDT for data transmission at short distances in papers [2, 3, 4]. The generated model of the eddy current flaw detector uses Bluetooth [2, 3] and Wi-Fi technology [4]. The application of GSM technology is considered in [5]. It considerably increases the transmission distance of the data obtained.

Mobile devices (smartphones, tablets, etc.) with powerful computing capabilities and touch screens have become widespread in our time. It was set the task of developing a defectoscope using a mobile device as a block of processing the results of control in this work.

Let's consider the structural scheme of the created ultrasonic flaw detector with wireless data transmission (Fig. 1). The converter unit can be divided into two parts: analog (1) and digital (2). An analog incorporates a shock excitation generator, represents as a piezoelectric converter (PCT), which is fed through the key (K) by the reference voltage (RV). The frequency of generator is set by a short pulse supplied from the control unit (CU). The generated impulse propagates in the object of testing (IO). It is reflected and re-enters the PEC after reaching the bottom surface or defect. The resulting echo pulse has a small amplitude, so before digitizing it must be amplify (A). The main task of the digital part (2) is to convert an analog signal to a digital (ADC) and, to transmit it to the information processing unit (DR) through the information transfer unit (DT).

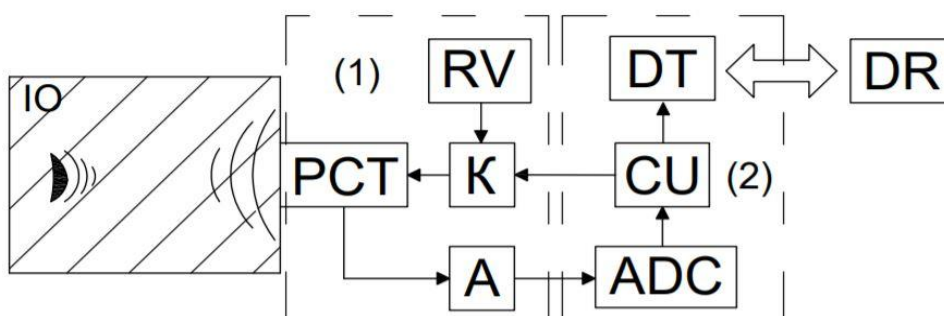


Figure 1. Structural diagram of ultrasonic defectoscope

IO - Investigated object, RV - reference voltage, K - key, PCT – Piezo ceramic transducer, A - amplifier, ADC - analog-digital converter, CU control unit, DT – Data transmitter, DR – Data receiver

A model of a mobile ultrasonic flaw detector was created based on this scheme. It is able to use ultrasonic sensors with different frequency of resonance (1 / 1.25 / 2.5 / 5 MHz)

due to the use of high frequency sampling ADCs. It is possible to install software with a more advanced and optimized code due to work flexibility with microcontrollers.

At the heart of the device is a microcontroller of STM Company, namely chip STM32F4 series with 32-bit ARM Cortex-M4 core. This architecture makes it possible to use several auxiliary modules at once.

The following components were chosen as the circuit of the acoustic oscillator pulse actuator (Figure 2): two complementary pairs of MOSFET transistors TC8220K6-G, Microchip Technology driver circuit chip M1822 and two pairs of two protective diodes MMBD3004BRM-7-F. This circuit can work with a wide range of output voltages ($\pm 100V$). The M1822 driver chip gives a chance to operate transistor switches using a wide range of standard voltages (1.8V-5V) for controllers, and diodes are used to protect transistor pairs from high voltage levels acting on the transducer.

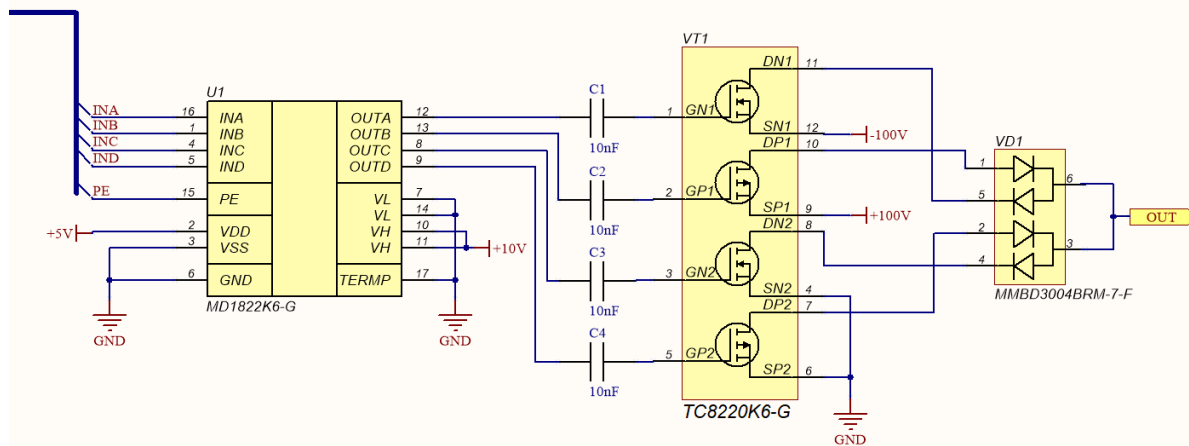


Figure 2. Scheme of pulse exciter of acoustic oscillations with electric damping

We have the opportunity to connect two independent sensors, or connect one sensor and make it an electric damping channel (as shown in Figure 2) due to the presence of two pairs of complementary transistors in the circuit.

During the market research, it was decided to use ADC08060CIMT / NOPB ADCs from Analog Devices. This 8-bit ADC has a sampling rate of 20 - 60 MSPS (Million Signals Per Second), which allows you to work with any sensors, which frequency does not exceed 30 MHz.

It was decided to use Bluetooth wireless technology in the information transfer block. For its implementation, the module BK8000L was used, which is made according to the Bluetooth 3.0 specification. The advantages of such a module include two built-in radio systems: the first provides data transfer speeds of 3 Mbps (standard for Bluetooth 2.0); The second is compatible with the 802.11 standard and provides the ability to transfer data at up to 24 Mbps, and its power consumption is once lower than its competitors and is 32mA.

There is full-speed USB OTG (Universal Serial Bus On-The-Go) as an optional physical data transfer port provided by the capabilities of the microcontroller.

This transmission protocol is compliant with the standards of USB 2.0, as well as OTG 1.0, runs at speeds up to 12 Mbps. This communication channel is more auxiliary than the main one, because it serves as the port for software recording and Li-pol battery charge.

The processing of the received signal can be realized on various devices, the characteristics of which depends on the speed of data processing. At the moment, a mobile application has been developed that allows to visualize the received signal in the form of A-scan, that is a two-dimensional reflection of the amplitude variation at the input of the defectoscope in the passage of time. To construct the image of B, C and other openings, it is necessary to use a flaw detector in conjunction with path sensors.

Conclusions. The portable ultrasonic flaw detector discussed in this article has several advantages over existing devices and for now. The investigation is based on an ultrasonic method for defect detection, which makes the control process not only safe, but also sufficiently precise for unambiguously establishing the state of the research object. Thanks to the analysis of modern electronic elements, energy consumption was minimized, which in turn increased the device's operating time, with the same power source parameters. Taking into account of a power source, it is worth noting that Li-pol batteries are used, which at small sizes can store large volumes of charge. The use of wireless data transfer technology makes it possible to use the device in automated systems to inspect the welds of sheet material, gluing, soldering, etc. for the presence of various defects. The possibility of using the radio waves of information transmission allows the use of more advanced data processing systems at considerable distances from the IO.

1. Петрик, В. Ф. Использование беспроводных технологий в дефектоскопии / В. Ф. Петрик, Г. М. Ковтун, Д. М. Топиха // Ж-л «Научни Известия НТСМ»: материалы международной конференции «Дни НК 2014». – Созополь, 2014. – № 150 – С. 486-488.

2. Протасов, А.Г. Вихрострумовий дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку / А.Г. Протасов, К.М. Серий, О.Л. Дугін, В.Ф. Петрик // Вісник НТУ "ХПІ". - 2014 р. - № 19. – С.132-139.

3. Протасов, А.Г. Телеметрический вихретоковый дефектоскоп / А. Г. Протасов, В.Ф.Петрик, А.Л.Дугин // Журнал «Научни Известия НТСМ» : материалы международной конференции «Дни НК 2014», г. Созополь, 09-18 июня, 2014 г. – Созополь, 2014. – № 1(150) – С. 34 – 36.

4. Петрик, В.Ф. Мобильный вихретоковый дефектоскоп с беспроводной системой передачи данных / В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин, В. В. Карпинский, А.Л. Кустовский, Ю. Ю. Лисенко // Журнал «Научни Известия НТСМ» : материалы международной конференции «Дни на безразрушительния контрол 2016», г. Созополь, 2016 г. – Созополь, 2016. – № 1(187) – С. 43 – 45.

5. 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 : БНТУ, 2017. - С. 74-76.

PROBLEMS OF TRAINING NDT SPECIALISTS IN UKRAINE

Protasov A.

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

Introduction. The Non-Destructive Testing (NDT) specialists provide a quality exam for various kinds of products, conduct inspection of potential accident industrial objects, and provide their safe exploitation. Such branches of industry as aviation, ground transportation, nuclear power stations, and civil engineering can't even exist without NDT specialists. All people need high quality products, to be protected from terrorism and technogeneous catastrophes. Thus, NDT specialists are desired in any society.

The features of professional activity. The professional activity of the NDT engineers has distinctive features as compared with common engineers. The fulfillment of complicated tasks with high level responsibility is expected from them not only high standard of knowledge in their field, but certain abilities and personal merits which are professionally required. This is the reason to emphasize some features of such profession which have to be taken into consideration at specialist preparation.

First of all, NDT engineers have to be able not only use the procedure and devices for discovering defects in an object, but have enough competence to take decision about availability of this object for further exploitation. The wrong decision can lead to human sacrifices. So, NDT engineers must have higher responsibility for a mistake the value of which can be very high. Thus, in this case the main advantages of a specialist are abilities to take decision in specific situation, to be responsible for this decision, and not only knowledge and profession skills.

The second, NDT engineers have to demand the stopping of object exploitation if they discover something wrong in it. So, specialists must have objectivity, persistence, adherence to principles, and so on.

Considering the requirements to the NDT specialists we can specify their abilities: high level of competence included knowledge and skills; understand the particulars of complicated situations and find the optimal solution; high professional and social responsibility. Question is: How is it possible to form necessary abilities for future specialists?

The problems of professional training. NDT is a complex specialty. Specialists have to acquire knowledge from different directions of engineering. Students study from physics of surface, electromagnetic field, optics, acoustics, and thermal physics to nucleus physics. Moreover, they have to know how to use electronics (microprocessors, microcontrollers), programming, and signal processing technique for designing automatic system of NDT. So, the process of forming student's competence becomes complicated by some reasons. First of all, differentiation of the teaching content and extend student's knowledge in one subject may lead to loss the logic connection with others. Sometimes student can't perceive the system of knowledge as a whole system. Besides, the loss of subjects logic connection complicates forming and development of student system-logical thinking. As a result, future specialists don't have system perception of their specialty, its professional and social aspects.

The second is a contradiction between knowledge extension and time limitation for teaching. It is obvious that the traditional informative method when the instructor tries to deliver large information content becomes ineffective. In any case, this information content won't be enough to provide students for high level of competence during their professional career because engineering knowledge becomes old very soon. Therefore, it makes sense to

stimulate and develop the cognitive interest of students, forming the skills to get and use necessary information independently.

The third is a contradiction between the principles of knowledge unity and divided it into fundamental and special ones. This problem is directly connected with forming professional competence of the future specialists. On the one hand, students have to know fundamental subjects perfectly in order to become proficient in special ones. On the other hand, deepening into fundamental knowledge shifts the accent of student preparation and reduces time for studying special subjects which are the basis of professional competence and skills [1].

What is the professional competence? Now day European Union countries introduce a new system of education. This system of student preparation is directed at forming not only knowledge and skills but special competences also. The traditional system of education is based on two ways of the educational process organization. The main feature of the first way is content of student training, i.e. what exactly instructor deliver is at the centre of attention. The second way is based on the process of training, i.e. the main feature is how the instructor delivers the course.

New system of education is based on the competence method approach which has result of education different from the traditional one. The result of education for new system is not amount of learned information only. It is also specialists' ability to apply this information to different complicated situations and get missing information independently. In other words, the result of student education is presence or absence necessary competences after their graduation.

The problem of competence-oriented education was considered in the papers of European authors - E. Short, Sim Shaw, A. Shelton, W. Hutmacher, T. G. Roos, and others. According to E. Short, competence is combination of knowledge, skills and operation [2]. Simon Shaw gave definition of the eight groups of base skills which were useful for professional activity and daily needs as well [3]. A. Shelton proposed the five groups of key competences which depend on professional activity of a person. The first one depends on psychophysical abilities of a person. These are abilities to attract attention, reaction time, coordination, and others. The second competence group is connected to professional abilities and skills. The third one determines cognition abilities, such as creative thinking and others. The fourth reflects individual abilities - self-reliance, responsibility, and aim at success. The fifth is social abilities – ability to cooperate and connectivity [4]. The description of the term “key competences” was given on European Council symposium in 1996. The report of European experts “Key Competences for Europe” was devoted to definition of five main groups of key competences which were very important for student preparation. There are political, social and cultural, communicative, social and informational, and personal competences among them.

The German scientist Roos T.G. considers that present-day worker has chance to find job if he possesses of a “competences portfolio”. He must solve a problem instead of fulfill a task.

The issue of education modernization is widely discussed in Ukraine also. According to Ukrainian law, quality of higher education is “total abilities of a graduated person which demonstrate professional competence, value direction, social orientation, and satisfy the personal and public requirements”. One of the directions for education modernization is application competence-oriented approach more widely. It means forming activity skills in specific situations, in other words forming professional competence.

In general the specialists' professional competence we can represent as a combination of functional competences in common to the scientific, professional, individual – psychological, and social relations areas. Competence in common to the scientific area is a base of the given profession. It consists of common, subject, and academical competences. This conception is characterized by professional knowledge, intellectual activity, ability for analytic thinking, constructively discharge their obligations, and ability for extend their

knowledge. Competence in professional area can be form by professional, academical, key, personal, and others competences. It is characterized by ability for acting on the high level in specific professional area, realizing the program, and foreknown the results of this acting. Competence in individual – psychological area is based on personal competences which stimulate development of a personality in the context of a chosen profession, form the motivation for development of competence and tendency to check and evaluate of specialists’ activity. The conception of competence in individual – psychological area is characterized by specialists’ ability to study without assistance, to take decisions, and to account for specialists’ activity. Competence in social relations area is based on social, personal, and key competences which provide for specialists’ ability for working in a team, having social responsibility for the results of their professional activity, knowing and keeping to traditions, and managing of information and communication technology. Thus, acquired student knowledge and skills is a base of the future specialists’ professional competence.

Professional competence of NDT specialists. Accordingly to Bologna Declaration, Ukrainian system of higher education has two levels of specialist preparation: bachelor and master's degree.

Present Ukrainian classification of professional activity in the technical field is divided on: performing, operating, producible- servicing, and researching levels. The specialist model has to describe the set of competences, professional duties, and the level of preparedness to accomplish specific functions.

Taking into consideration mentioned classification and professional activity features of NDT specialists; let’s propose the structure of professional competence for specialists with bachelor and master's degree. The typical bachelor’s professional activities in the NDT field are: experimental- research, manufacturing- servicing, calculation-design, and administration activities [5].

Competence in experimental- research activity provides a bachelor with abilities to:

- carry out the research of testing object models using present-day standard software and methods of mathematical simulation;
- realize experiments and result analysis using given procedure;
- study scientific and technical information

Competence in manufacturing- servicing activity is proposed bachelor’s skills:

- to use NDT devices for inspection of products;
- to use monitoring systems for technologic forecasting of the object condition;
- to tune up, install, and activate software and hardware of NDT devices;
- to specify technical conditions of devices using monitoring devices.

Competence in calculation-design activity provides a bachelor with abilities to:

- calculation and design components of NDT devices;
- check capability of the projects and technical documentations to technical requirements;
- engineering design of technical documentations

Competence in administration activity provides a bachelor with abilities to:

- certification and standardization of NDT devices;
- organization marketing and selling of NDT devices;
- using economic and administrative methods of management

Analyzing bachelor’s professional activities, we can consider that experimental-research activity belongs to common to the scientific area, manufacturing- servicing and calculation- design activities belong to professional area, and administration activity relates to individual – psychological and social relations areas.

It is obviously that specialist must be intellectual developed. Therefore, the footing of the bachelor’s professional competence forming must develop students’ creative abilities, namely: creative thinking and creative activity.

The master’s training program is based on the bachelor’s one. So, we consider that a future master is ready to fulfill the work that a bachelor can. The masters are preparing for following professional activities in the NDT field: research, design, and management activities [6].

Competence in research activity provides a master with abilities to:

- create of the mathematical and physical models of NDT devices;
- design procedure of the experiments and test operation

Competence in design activity is proposed master’s skills:

- to analyze advanced direction of NDT devices development;
- to design technical documents for manufacturing of NDT devices

Competence in management activity provides a master with abilities to:

- organize management for improvement and modernization of NDT devices;
- search the optimal solution for making of NDT devices taking into account quality, reliability, and value requirements.

Let’s refer research activity to common to the scientific area, design activity to professional area, and management activity to individual – psychological and social relations areas.

Professional competence of the master has to provide with implementation of an innovation cycle: scientific investigation work – research design work – manufacturing new product. In this case, the master’s creative ability displays itself in master’s research and innovation activities.

Conclusion. Present-day reality needs new well founded models for engineering education which take into account features of student’s personality and requirements of industry. Forming of specialists’ professional competence is one of the important problems of future engineer preparation. The specialist’s professional competence is a complicated factor which includes prime competences based on acquired knowledge and skills. The footing of the specialists’ professional competence forming is development of students’ creative abilities.

1. Протасов А.Г. (2012) Теоретико-методичні засади формування професійної компетентності майбутніх фахівців з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Автореф. д-ра пед. наук., НТТТУУ «КПІ» 2012.–39 с.

2. Short E. (1985). *The Concept of Competence: Its Use and Misuse in Education. Journal of Teacher Education. Vol. 36, Number 2, p. 5.*

3. Simon Shaw (1998 June). *Development of Core Skills Training in the Partner Countries. Final Report for the ETF Advisory Forum Sub-Group D, European Training Foundation.*

4. Roos. T. G. (2002 Juni). *Die Arbeitswelt im Jahre 2020: Was Bedeutet sie fur die Bildung. Leicht geandert fur Thurgauer Zeitung. p. 38-31.*

5. Протасов А.Г., ВФ Петрик (2015). *Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі*. НТУУ «КПІ», 266.

6. Протасов А. Г. (2017) Шляхи підвищення конкурентоспроможності національних фахівців з неруйнівного контролю на міжнародному ринку праці. УТ НКТД, с.73-77.

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ РАДИОГРАФИИ (RTC)

*Н.П. Казеннов, А.В. Павлий, М.В. Юрьев
НПФ «Диагностические приборы», г. Киев*

Наша компания уже более 10 лет поставляет на рынок Украины системы компьютерной и цифровой радиологии. Любая схема радиационного контроля предполагает наличие источника ионизирующего излучения, исследуемого объекта и носителя информации (рентгеновская пленка, фосфорные пластины, полупроводниковые индикаторные панели, и т.д.). В настоящее время существует три основных вида радиационного контроля, используемых для неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности:

1) RTF – пленочная технология, (аналоговый сигнал), классический метод, использующий экспозицию на рентгеновскую пленку с последующей химической обработкой реактивами находящимися в жидкой фазе;

2) RTC – компьютерная радиология, использующая в качестве промежуточного носителя аналогового сигнала многоразовые фосфорные пластины. Получение цифрового сигнала осуществляется на выходе специального сканирующего устройства;

3) RTD – цифровая радиология, при которой цифровой сигнал формируется непосредственно на детекторной панели.

ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ RTC – система типа «ФОСФОМАТИК-21», адаптированная компьютерная система цифровой радиологии, изначально применяемая в медицине катастроф. Например, OREX (барабанная загрузка, крепление фосфорной пластины в сканере на люверсах, большая вибрация, постоянный изгиб фосфорной пластины. Максимальный размер фосфорной пластины Flex –HR (GP) 200 x 297 мм. Программное обеспечение с простейшими фильтрами.



Рис. 1 - Компьютерная система цифровой радиологии

ВТОРОЕ ПОКОЛЕНИЕ RTC – система KODAK ACR 2000i. Вертикальная загрузка и горизонтальная выгрузка фосфорной пластины. Отсутствие неподрессоренных вращающихся частей. Максимальный размер фосфорной пластины типа GP,HR, XL BLUE 300x400 мм. Монитор высокого разрешения. Наличие медицинского аналога сканера. Люминесцентные лампы эрайзера.



Рис. 2 - Система KODAK ACR 2000i

ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ RTC – система NDT CARESTREAMHEALTH HPX-1. Горизонтальная загрузка и движение пластины в одной плоскости. Возможность использования жестких кассет и дополнительного кассетного носителя. Новая версия программного обеспечения типа INDUSTREX версия 5.2. Галогеновые лампы эрайзера.

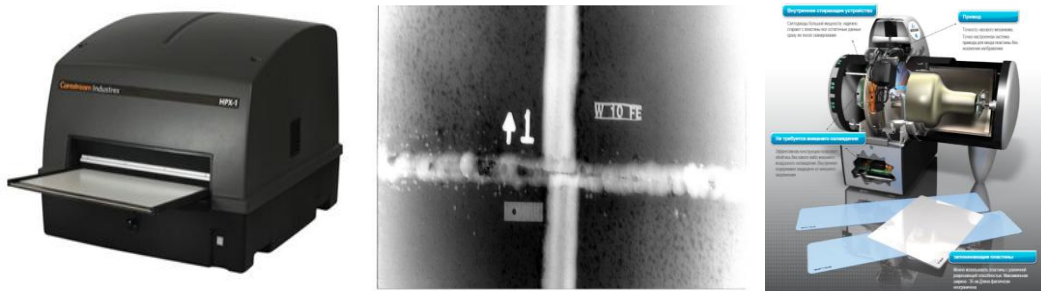


Рис. 3 - Система NDT CARESTREAMHEALTH HPX-1

В конструкции этого типа учтены некоторые недостатки предыдущих моделей. Предусмотрены два вида загрузки фосфорных пластин:

- ручная загрузка пластины, предварительно извлеченной из кассеты;
- автоматическая загрузка пластин из специальной жесткой кассеты, присоединяемой к сканеру оператором.

В этом случае контакт пластины с окружающей средой сводится к минимуму. Герметичный корпус сканера оснащен вентилятором принудительного нагнетания воздуха, который создает избыточное давление внутри и препятствует попаданию пыли и загрязнению из воздуха. Стирающее изображение устройство (эрайзер), конструктивно находящийся в едином корпусе со сканером, состоит из блока галогеновых ламп мощностью 25 Вт каждая. Световой поток стирает скрытое изображение контролируемой детали и готовит фосфорную пластину к повторному использованию. При интенсивной эксплуатации сканера в три смены стирание изображения приводит к повышенному нагреву узлов сканера и самой пластины, находящий в непосредственной близости от галогеновых ламп. Такой нагрев вызывает коробление и даже частичное оплавление кромок пластины. В жаркий летний день штатная система охлаждения не способна эффективно охлаждать фосфорный блок ламп эрайзера и внутренние блоки сканера.

ЧЕТВЕРТОЕ ПОКОЛЕНИЕ RTC – система NDT CARESTREAMHEALTH HPX-PRO специально для контроля сварных швов в полевых условиях. Повышенная вибро и термоустойчивость сканера. Вес – 16кг, без специальных требований к источнику питания. Специальные фосфорные пластины Flex HR-PRO с дополнительным поверхностным ламинированием.



Рис. 4 - Система NDT CARESTREAMHEALTH HPX-PRO

ПЯТОЕ ПОКОЛЕНИЕ RTC – пример, платформа INDUSTREX NDT. Согласно данным МАГАТЭ по состоянию на 2015 год [1] количество сертифицированных ИТР, прошедших полный курс обучения компьютерной радиографии в Германии превысило 1200 человек.

Платформа INDUSTREX NDT позволяет конфигурировать все составляющие элементы для решения конкретной инженерной задачи неразрушающего контроля и технической диагностики. Программа работает со всеми устройствами и не требует дополнительной настройки или специальных драйверов.



Рис. 5 - Ретроспектива развития метода

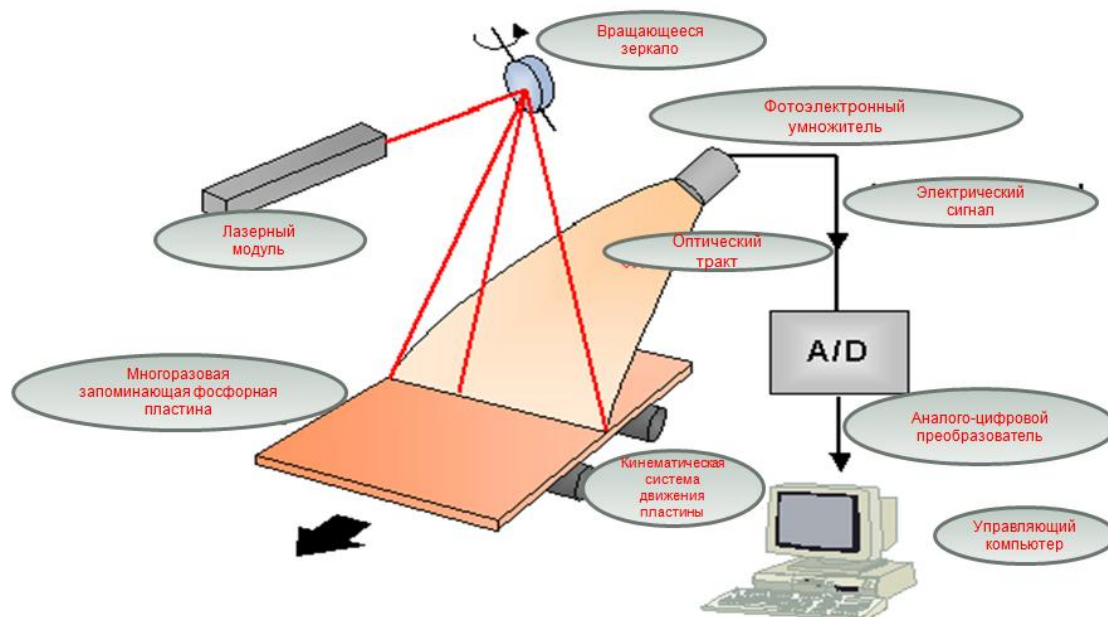


Рис. 6 - Схема компьютерного сканирования (фотостимулированная люминесценция, монохроматический источник – красный лазер, $m= 470_570\text{нм}$, возбуждаемое излучение синего цвета, $m= 390_400\text{нм}$)

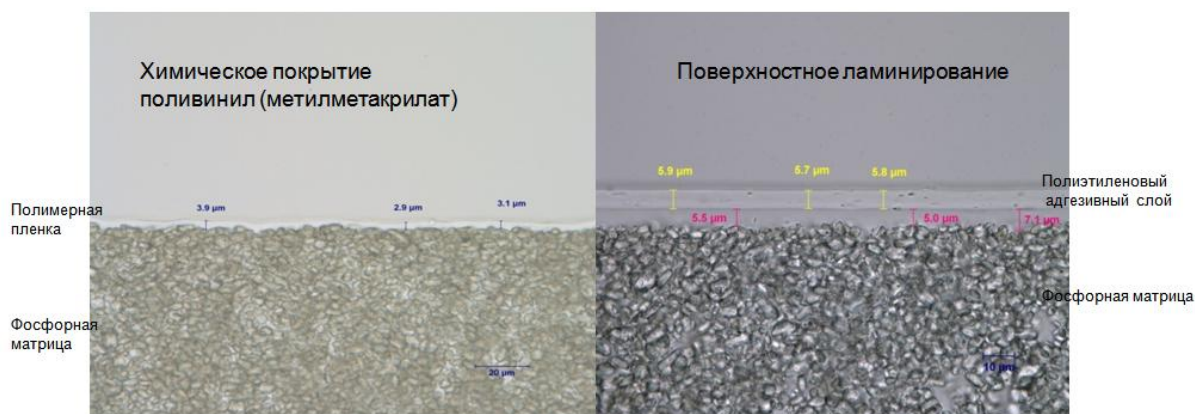


Рис. 7 - Структура защитного покрытия (Фосфорный слой – люминофор фторбромйодид бария, активированный двухвалентным европием, $(\text{BaFBr})/\text{I}:\text{Eu}^{2+}$)

По своим физико-химическим свойствам Фтор (F), Бром (Br), и Йод (I) относятся к VII группе (галогены) периодической таблицы элементов и в совокупности с элементом II группы Барием (Ba) образуют кристаллическую матрицу в которую в качестве модификатора свойств вводят добавки Европия (Eu- лантаноид, элемент редкоземельной группы). Эти химические соединения являются кристаллофосфорами и обладают свойством «запоминать» результат воздействия ионизирующего излучения в виде «скрытого изображения». В специально создаваемых условиях имеется возможность увидеть это изображение, а также стереть его.

Недостаток фторбромборида бария - гигроскопичность (восприимчивость к влаге). Под воздействием воды (в жидком или газообразном состоянии) люминофор разлагается. При этом высвобождается йод, который может накапливаться между фосфорным и защитным слоями пластины. Характерным признаком такого процесса является желто-коричневые пятна, появляющиеся на торце пленки. Поэтому на поверхность пластины нанесено защитное покрытие из влагостойкого полимерного

материала. Однако это покрытие, чтобы не исказить результаты считывания, имеет очень маленькую толщину. Следствием такого компромисса является ограниченная сопротивляемость фосфорных многоразовых пластин механическому воздействию.

Электронная жизнь фосфорных пластин (GP) в лабораторных условиях заявляемая производителем...до 8000 экспозиций. Однако в реальных условиях срок эксплуатации не превышает 3000-4000 экспозиций вследствие механических повреждений (в первую очередь расслаивание углов и появление трещин на обратной стороне фосфорной пластины (растрескивание черного слоя). Практический опыт показывает, что из пластины с трещинами можно вырезать неповрежденные участки и использовать их для контроля объектов меньшего размера. При этом нужно уделить внимание герметизации поверхности реза, чтобы избежать попадание влаги на фосфорный слой и препятствовать появлению коричневых пятен . Для этого подходит любой нитролак, даже маникюрный бесцветный лак.

Таблица 1. Сравнение параметров экспозиции RTF – RTC

| ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА, при экспозиции стыкового соединения трубы диаметром 325 мм на эллипс, через две стенки (радиационная RTF – RTC, толщина 16+16 +2+2 мм) | RTF, РЕНТГЕНПЛЕНКА KODAK HS800 +SMP-308 | RTC, ФОСФОРНАЯ ПЛАСТИНА типа Flex-HR |
|--|--|---|
| НАПРЯЖЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ, кВ | 200 | 200 |
| ТОК РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ, мА | 5 | 5 |
| ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ, мм | 700 | 700 |
| ВРЕМЯ ЭКСПОЗИЦИИ, с | 84 | 14 |

KODAK HS800 - высокочувствительная, высококонтрастная, среднезернистая, универсальная рентгеновская пленка для промышленного радиационного контроля (300x400мм).

KYOKKO SMP-308 металло-флюорисцентные усиливающие экраны гарантируют быстрый темп исследования, сокращения времени экспозиции, малое зерно и усиленную резкость изображения.

Рентгеновский аппарат AOLONG XXG-2005 (производство Китай):

- сокращено время радиографического контроля (в 4-8 раз) за счет исключения процесса фотографической обработки рентгеновских пленок;

- уменьшено время просвечивания контролируемых деталей (радиационная толщина 10-44 мм) в 2-3 раза, повышен ресурс работы генераторов рентгеновского излучения);

- снижено рабочее напряжение на рентгеновской трубке на 10-15%;

- снижена радиационная нагрузка на персонал категории А;

- упрощен процесс архивирования радиографических изображений , их поиск и обращение.

Таблица 2. Опыт лабораторной эксплуатации комплекса компьютерной радиографии KODAK ACR 2000i

| ПОКАЗАТЕЛЬ | ПРЕДПРИЯТИЕ 1 (ЛНМК) | ПРЕДПРИЯТИЕ 1 (ЦЗЛ) |
|--|--|--|
| Время эксплуатации, (годы) | 2009 – 2012 (4 года) | 2010-настоящее время |
| Количество фосфорных пластин | GP-20шт, HR-10шт, Одновременно используются 10-20 пластин | GP-4шт, HR-1 шт |
| Режим работы комплекса | 3 смены по 7 часов в сутки, Общая наработка около 100 000 экспозиций | Инспекция и ремонт технологического оборудования и продуктопроводов |
| (Материал контролируемых деталей) | Высоколегированные стали и сплавы, низкоуглеродистая сталь | Высоколегированные стали, конструкционная сталь |
| Среднее количество циклов СКАНИРОВАНИЕ- СТИРАНИЕ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ | 100-150 в смену | 20-30 в месяц |

Выводы

1) Системы компьютерной радиографии (RTC) могут быть технологически встроены в любую существующую традиционную систему рентгеновского контроля.

2) Наш более чем 10 летний опыт использования RTC показал, что этот путь является наиболее экономически эффективным при переходе от аналоговой к цифровой радиографии.

3) RTC – «портативный способ» и может быть использован как в лабораторных(производственных) условиях, так и на монтаже (в поле).

4) Фосфорные детекторные пластины в меру гибкие и достаточно прочные.

5) Замена рентгеновской пленки, отказ от реактивов для химической обработки, снижает общие трудозатраты.

6) Большой динамический диапазон изображения на фосфорных пластинах позволяет на одном снимке видеть и эффективно контролировать объекты различной радиационной толщины.

7) RTC позволяет снижать режимы экспозиции, уменьшать радиационную нагрузку на персонал, экономить ресурс работы рентгеновских аппаратов.

[1] *Guidelines on training, examination and Certification in digital industrial Radiology Testing (RD-T). TRAINING COURSE SERIES No. 60. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2015.*

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТАМОДЕЛЕЙ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ СУРОГАТНОГО СИНТЕЗУ

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

Сурогатний синтез дозволяє отримати накладні вихрострумові перетворювачі (НВСП) з однорідною чутливістю [1]. В цій роботі проілюстровано побудову метамоделі НВСП із використанням обчислювальної технології [2], де в якості системи збудження ВСП використовується кругова котушка з прямокутним перетином. При цьому побудова метамоделі виконувалася при варіації тільки двох змінних $J=f(x, y)$, які є просторовими координатами, та випадку, коли $J_x, J_y=0$. Із створених майже 360 одинарних RBF-нейронних мереж-претендентів для плану з числом точок $N=255$ та кількістю прихованих нейронів від 90 до 170, відібрано 7 найкращих за чисельними показниками коефіцієнту детермінації R^2 , $S.D.ratio$, середньої відносної величини модельної похибки $MAPE, \%$. Отримані метамоделі мають середню величину модельної похибки на етапі навчання від 3,59 до 5,63 %. На етапі відтворення поверхні відгуку на значно більшій кількості точок рівній $N=1681$ дана похибка складає 4,45-7 %. Рівень похибок на етапі навчання та відтворення поверхні відгуку є доволі прийнятним, але може бути зниженим.

Методами підвищення точності метамоделей є використання множинних нейронних мереж, зокрема їх комітетів та їх композитної побудови [3-5]. Основна ідея побудови композитної нейронної мережі полягає в наступному. Отримана перша нейронна мережа використовується для навчання другої, де на етапі навчання застосовується абсолютна похибка апроксимації, яка є результатом побудови першої нейронної мережі. Дана процедура повторюється додаванням необхідної кількості нейронних мереж до тих пір, поки не отримано задовільне значення $MAPE$. Така побудова нейронних мереж дає поступове зменшення похибки апроксимації від мережі до мережі. Тобто кожна наступна додана нейронна мережа апроксимує поверхню похибки. Загальний відгук поверхні J_Σ отримується додаванням відгуків від кожного виходу (J_1, J_2, \dots, J_n) нейронних мереж.

Так, взявши за основу отриману одинарну метамоделю RBF-2-135-1(130) [1], що має $S.D.ratio=0,0742$, $MAPE=4,78 \%$, $MS_R=0,000575$ і застосувавши композитну побудову нейронних мереж, вдалося покращити точність отриманої метамоделі як на етапі навчання, так і на етапі відтворення (табл.1).

Таблиця 1. Чисельні показники якості композитної нейронної мережі

| Композитна нейромережа | Метамоделі, що є складовими композиту | MAPE, % | | MS _R | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|-------------|-----------------|-------------|
| | | навчання | відтворення | навчання | відтворення |
| J ₁ | RBF-2-135-1(130) | 4,78 | 5,79 | 0,000575 | 0,000552 |
| J ₂ | RBF-2-147-1(73) | 2,65 | 3,81 | 0,000114 | 0,000158 |
| J ₃ | RBF-2-156-1(8) | 1,75 | 3,09 | 0,0000511 | 0,000099 |
| J ₄ =J _Σ | RBF-2-180-1(23) | 0,96 | 2,64 | 0,0000444 | 0,000094 |

На завершальному етапі виконувалася перевірка адекватності відтворюваності поверхні відгуку за допомогою отриманих математичних моделей у всій області

моделювання із застосуванням формул, які описують вихід RBF-нейронної мережі, а також проводилася їх оцінка на адекватність та інформативність. Аналіз результатів, наведених в таблиці 1 показує, що застосувавши чотири каскади нейронних мереж середню помилку апроксимації зменшено майже в 5 разів на етапі навчання та в 2 рази на етапі відтворення, що відповідно показує ефективність використаної технології побудови метамоделі.

Для випадку побудови метамоделі нерухомого НВСП із варіюванням трьох параметрів $J=f(x, y, r)$, де r – радіус котушки збудження, в межах $x = 0...30$ мм; $y = 0...30$ мм; $r = 1...15$ мм створено майже 320 одинарних RBF-нейронних мереж для плану з числом точок $N = 2048$ та кількістю прихованих нейронів від 280 до 350, з яких відібрані найкращі за вище вказаними показниками. Отримані найкращі метамоделі мають середню величину модельної похибки від 22 % до 29 %. В цьому випадку підвищення точності апроксимаційної задачі було досягнуто іншим методом побудови метамоделі за допомогою комітету із шести нейронних мереж [4]. Проте отримати суттєвого зменшення похибки апроксимації із застосуванням комітету нейронних мереж не вдалося, так на етапі навчання нейронної мережі отримано $MAPE = 18.08$ %, а на етапі відтворення 19.8 % відповідно. Тому як варіант підвищення точності метамоделі також застосовано технологію побудови композитної нейронної мережі. Для подальшого удосконалення метамоделі за основу взята нейронна мережа RBF-3-282-1(156), яка є першою в композиції мереж. Для композитної мережі, яка має вісім каскадів, отримано наступні показники якості на етапі навчання та відтворення (табл.2).

Таблиця 2. Чисельні показники якості композитної нейронної мережі

| Композитна нейромережа | Метамоделі, що є складовими композиту | MAPE,% | | MS _r | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|-------------|
| | | навчання $N=2048$ | відтворення $N=7166$ | навчання | відтворення |
| J ₁ | RBF-3-282-1(156) | 22,6 | 31 | 0,00057 | 0,000558 |
| J ₂ | RBF-3-280-1(31) | 21,52 | 28,76 | 0,000274 | 0,000279 |
| J ₃ | RBF-3-308-1(39) | 18,22 | 24,35 | 0,000186 | 0,000204 |
| J ₄ | RBF-3-278-1(14) | 17,13 | 22,06 | 0,000154 | 0,000168 |
| J ₅ | RBF-3-292-1(24) | 14,95 | 19,98 | 0,000123 | 0,000144 |
| J ₆ | RBF-3-301-1(25) | 13,49 | 17,85 | 0,0001 | 0,000121 |
| J ₇ | RBF-3-305-1(10) | 12,21 | 16,79 | 0,0000844 | 0,000104 |
| J ₈ =J _Σ | RBF-3-301-1(4) | 10,12 | 15,93 | 0,0000709 | 0,0000923 |

Таким чином, застосувавши композитну побудову із шести каскадів нейронних мереж, отримано результати середньої похибки апроксимації, які співвимірні із результатами при використанні комітету нейронних мереж. Проте зі збільшенням кількості каскадів точність метамоделі підвищується. Тобто побудова метамоделі за допомогою комітету нейронних мереж та композитних мереж дають покращення середньої величини модельної похибки у порівнянні із одиночними мережами.

1. Гальченко В. Я. Нейромережева метамоделі циліндричного накладного вихрострумовевого перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – № 3 (66). – Т. 1. – С. 32–38.

2. Гальченко В. Я. Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2018. – № 74. – С. 60-72.

3. Ковалевский С. В. *Аппроксимация функций с помощью каскадных нейронных сетей [Текст] / С. В. Ковалевский, В. Б. Гитис // Штучний інтелект. – 2008. - №4. – С. 589-593.*

4. *Neural Network Based Response Surface. Methods – a Comparative Study / [W. Beyer, M. Liebscher, M. Beer et al] // LS-DYNA Anwenderforum, Ulm. – 2006. – P.29-37.*

5. Хайкин Саймон. *Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.*

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ В ПРОБЛЕМІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБ’ЄКТІВ КОНТРОЛЮ ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ

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

Неруйнівний контроль вихрострумовим методом часто застосовується в промисловості і має ряд беззаперечних переваг, серед яких висока швидкість сканування, безконтактність, стійкість до впливів зовнішнього середовища, електрична природа сигналу, але головною його особливістю є багатопараметровість сигналу. Нерідко об’єктами контролю (ОК) виступають циліндричні вироби, такі як вали та труби, що проходять термообробку чи насичення поверхневого шару речовинами, в наслідок чого змінюються електрофізичні параметри матеріалу цих виробів.

В даній роботі пропонується вирішення задачі реконструкції електрофізичних параметрів ОК, в яких електропровідність (ЕП) та магнітна проникність (МП) матеріалу змінюються вздовж радіусу. ОК є магнітні та немагнітні струмопровідні циліндричні вироби, що тестуються зовнішнім прохідним вихрострумовим перетворювачем (ВСП). Актуальною є задача визначення параметрів ЕП та МП як функції від радіусу по результатам контролю ВСП. Ця зворотна задача в оптимізаційній постановці потребує багатократного вирішення прямої задачі.

Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати мультичастотний метод. А саме, в якості вихідних даних для її розв’язку застосовувати значення індукованої ЕРС з різною частотою струму збудження ВСП, що впливає на глибину проникнення вихрових струмів. Для спрощення цієї задачі доцільно застосувати кусково-постійну апроксимацію ОК, тобто умовно поділити переріз об’єкту на шари, припускаючи що ЕП та МП є константами в кожному шарі. Це дозволяє спростити рішення прямої задачі до знаходження комплексних значень індукованої ЕРС в залежності від кількості умовно окремих шарів ОК.

Припускаємо, що одновиткова котушка (рис.1) з радіусом r_0 знаходиться навколо багатошарового ОК при умові $r_0 > r_1$. Вісь котушки та вісь ОК співпадають.

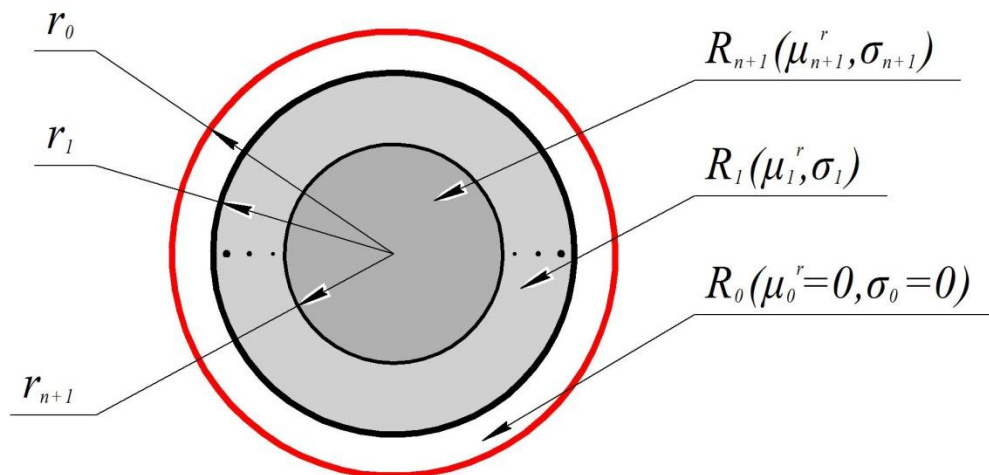


Рис.1 – Одновиткова котушка навколо багатошарового об’єкта

Аналітичні формули для рішення прямої задачі наведено в [1], тобто розв’язок прямої задачі не спричинятиме ускладнень.

Ненульовий компонент векторного потенціалу в області вимірювальної котушки можна знайти як

$$A_0^{ind}(r, z) = \frac{\mu_0 r_0 I}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}_2 K_1(\lambda r) \frac{K_1(\lambda r_0)}{K_1(\lambda r_1)} e^{j\lambda(z-z_0)} d\lambda,$$

де μ_0 – магнітна стала, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

r_0 – радіус котушки збудження;

I – струм в котушці збудження;

$$\tilde{B}_2 = -\frac{2\mu_1^m \mu_2^m I_1(qr^2)(D_1 - 2r_2 \lambda D_2) + 2\mu_1^m q I_1'(qr_2) D_1}{r_1 D} - I_1(\lambda r_1);$$

μ_n – відносна магнітна проникливість шару матеріалу ОК, $\mu_n = \mu(r)$;

$I_\nu(s)$ – модифікована функція Бесселя першого роду ν порядку;

$K_\nu(s)$ – модифікована функція Бесселя другого роду ν порядку;

$$D = \mu_2^m I_1(qr_2) D_5 (D_1 - 2r_2 \lambda D_2) + 2\mu_1^m q I_1'(qr_2) D_1 D_5 - \\ - 2r_1 \lambda \mu_2^m I_1(qr_2) K_1(\lambda r_1) (D_3 - 2r_2 \lambda D_4) - 4r_1 \mu_1^m \lambda q I_1'(qr_2) K_1(\lambda r_1) D_3;$$

$$D_1 = I_\nu(\lambda r_2) K_\nu(\lambda r_1) - I_\nu(\lambda r_1) K_\nu(\lambda r_2);$$

$$D_2 = I_\nu'(\lambda r_2) K_\nu(\lambda r_1) - I_\nu(\lambda r_1) K_\nu'(\lambda r_2);$$

$$D_3 = I_\nu(\lambda r_2) K_\nu'(\lambda r_1) - I_\nu'(\lambda r_1) K_\nu(\lambda r_2);$$

$$D_4 = I_\nu'(\lambda r_2) K_\nu'(\lambda r_1) - I_\nu'(\lambda r_1) K_\nu'(\lambda r_2);$$

$$D_5 = 2\mu_1^m \lambda K_1'(\lambda r_1) + K_1(\lambda r_1);$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{4} + p_i^2};$$

$$p_i = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_i^m\sigma_i^m};$$

$$q = \sqrt{p_{n+1}^2 + \lambda^2};$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

r_n – зовнішній радіус шару ОК;

σ_n – питома електрична провідність шару матеріалу ОК, $\sigma_n = \sigma(r)$.

Вважаючи котушку зовнішнього ВСП нескінченно тонкою та використовуючи значення векторного потенціалу можна знайти ЕРС індуковану в вимірювальній котушці ВСП

$$\mathcal{E} = -j2\pi\omega w_1 w_2 r_0 A_0^{ind},$$

де w_1, w_2 – кількість витків котушки збудження та вимірювальної котушки.

1. Koliskina V. Analytical and quasi-analytical solutions of direct problems in eddy current testing: doctoral thesis In Partial Fulfilment of the Requirements of the Doctor Degree in Mathematics [Subdiscipline of Mathematical modelling] / Koliskina Valentina. – Riga: Riga Technical university, 2013. – 193 p.

Електронне видання

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

МАТЕРІАЛИ

2-гої науково-технічної конференції
з міжнародною участю
(Люблін, Польща, 15 – 19 жовтня 2018 року)

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