

# АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ З НАКЛАДНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ПОДВІЙНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ

В.М. Учанін<sup>1</sup>, Г.Г. Луценко<sup>2</sup>, А.В. Опанасенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова 5.

E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

<sup>2</sup>Український НДІ неруйнівного контролю. 04070, м. Київ, вул. Набережно-Лугова, 8. E-mail: [office@ndt.com.ua](mailto:office@ndt.com.ua)

Розглянуто перспективи та стан проблеми створення автоматизованих систем неруйнівного контролю. Зазначено формування тенденції створення адаптивних автоматизованих систем для комплексного контролю, побудованих на застосуванні різних фізичних принципів для отримання синергетичного ефекту. Проаналізовано чинники, що впливають на варіативність сигналів вихрострумів перетворювачів під час ручного та автоматизованого вихрострумів контролю. Зазначено переваги селективних перетворювачів подвійного диференціювання для створення автоматизованих систем. Представлено особливості побудови та характеристики розроблених в Україні багатоканальних автоматизованих систем із застосуванням вихрострумів методу, зокрема: роботизована система вихрострумів контролю для виявлення та ідентифікації експлуатаційних дефектів труб печей вторинного риформінгу; вихрострумів тракт багатоканальної системи комплексного контролю залізничних осей під час їх виробництва; автоматизована система комплексного контролю колісних пар в умовах ремонтних підприємств; вихрострумів блок системи комплексного контролю залізничних рейок під час їх виробництва. Бібліогр. 30, табл. 1, рис. 12.

*Ключові слова:* автоматизована система, комплексний неруйнівний контроль, вихрострумова дефектоскопія, вихрострумів перетворювачі подвійного диференціювання

**Вступ.** Перебудова промисловості в рамках 4-ї промислової революції призводить до формування нових підходів у неруйнівному контролі (НК) під аббревіатурою NDE 4.0 (Non-destructive Evaluation 4.0), де питання автоматизації контрольних операцій (у тому числі з використанням роботів) займають чільне місце [1, 2]. Під автоматизацією будемо розуміти сукупність технічних і програмних засобів, що забезпечують проведення НК без прямої участі людини. Без часткової або повної автоматизації неможливо забезпечити великі об'єми НК у багатьох галузях промисловості. Автоматизований НК застосовують не тільки під час виробництва, де найпростіше забезпечити контроль виробів простої форми у вигляді тіл обертання (труб, прутків, дротів, кульок тощо), що вже давно можна вважати звичайним явищем. Цей контроль під час експлуатації виробів створює унікальні можливості НК без участі людини у небезпечних і шкідливих для здоров'я середовищах [3, 4]. На перших етапах розвитку НК запроваджувались переважно методи ручного НК, коли всі процедури від підготовки апаратури та сканування поверхні об'єкта контролю (ОК) до прийняття рішення про якість чи дефектність виробу виконував оператор (контролер, дефектоскопіст). Такий підхід призводив до суттєвого обмеження надійності та достовірності контролю через залежність отриманих результатів від кваліфікації

оператора. Щоб позбутися впливу цього чинника, впроваджувались жорсткі вимоги щодо навчання та сертифікації персоналу за методами НК і виробничими секторами, акредитації лабораторій та верифікації процедур НК. Для реалізації цих вимог в Україні зокрема діє стандарт ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю», який повністю відповідає міжнародним нормативним документам. Тому найважливішим позитивним ефектом від впровадження автоматизованого НК слід вважати підвищення його достовірності. У той же час у науковій літературі з'явилися застереження щодо можливих ризиків і виробничих втрат, що можуть супроводжувати автоматичний НК через його невідповідне використання та розповсюджену (і не завжди обґрунтовану) довіру щодо його надійності [5, 6].

Іншим за значенням ефектом автоматизації можна вважати збільшення продуктивності НК, що особливо важливо в умовах неперервного виробництва. Зазначимо, що автоматизація НК не знижує значення оператора або інженера, що приймає рішення про якість виробу або надійність конструкції. Впровадження автоматизованих систем НК вимагає від них знань вищого рівня, необхідних для визначення бракувальних критеріїв, внесення змін в алгоритм контролю виробів залежно від нормативних документів (стандартів), що відповідають вимогам конкретного замовника тощо.

Учанін В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>

© В.М. Учанін, Г.Г. Луценко, А.В. Опанасенко, 2023

**Метою** цієї роботи є аналіз особливостей автоматизації вихрострумowego (ВС) контролю та презентація вітчизняних автоматизованих систем (АС) вихрострумowego контролю з накладними селективними вихрострумowymi перетворювачами (ВСП) подвійного диференціювання.

**Стан проблеми.** Окрема методологія створення автоматизованих систем НК (АСНК) досі ще не сформована. Тому на даному етапі логічним кроком є використання методологічних засад і підходів, напрацьованих щодо інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які є достатньо розвинутими [7–9], а також брати до уваги існуючі роботи з загальної теорії автоматизації [10–12]. При цьому необхідно зважати на особливості функціонування конкретного методу НК. Зазначимо також, що призначенням систем контролю (у тому числі НК) на відміну від ІВС є визначення відповідності технічного стану ОК нормативним вимогам та реєстрація відхилень параметрів, що характеризують технічний стан ОК, визначеним нормам. Для АСНК, метою яких є технічне діагностування ОК в експлуатації (у західній науковій літературі цей напрямок називають аббревіатурою SHM – structural health monitoring), необхідно також визначити причини невідповідності технічного стану ОК (зокрема, наявність дефектів, деградація матеріалів, зношеність робочих поверхонь тощо) з оцінюванням надійності та прогнозуванням термінів його подальшої експлуатації.

Зауважимо, що досить часто існуючі АСНК не тільки формують протокол з результатами проведеного НК, а і мають у своєму складі засоби для формування за отриманими результатами сигналів керування виконавчими механізмами, до яких зокрема можна віднести механізми розбраковування або маркування дефектних зон. Такі АСНК вже мають ознаки автоматизованих систем керування технологічними процесами [13].

Слід зазначити, що в питаннях автоматизації НК не існує чіткої термінології, так як у літературі часто зустрічаються терміни «механізований», «автоматизований», «напівавтоматизований», «автоматичний» [14]. До механізованих можна віднести засоби НК, у яких операції сканування повністю або частково (за однією з координат) виконуються автоматично. Оператор при цьому зазвичай перевіряє роботоздатність і калібрує установку на стандартному зразку (СЗ), приймає рішення про наявність дефекту та формує протокол контролю. Автоматизовані системи НК здебільш передбачають автоматизацію операцій доставляння ОК на позицію контролю та сканування поверхні ОК, перевірку роботоздатності на СЗ і формування протоколу про наявність дефектів та

їх координати. Проте рішення про якість виробу приймає оператор найвищого рівня кваліфікації на основі аналізу протоколу контролю і, за необхідності, результатів додаткових контрольних операцій. До автоматичних можна відносити системи НК, у яких усі операції, включно з прийняттям рішення про якість виробу та відповідність нормативним документам і вибраковуванням неякісної продукції, виконуються без участі оператора. Чи відображує така класифікація сучасний рівень розвитку техніки? Скоріше за все, – ні, так як з'явилися, зокрема, АС на основі використання роботів, які несуть різноманітну апаратуру НК. Для НК важкодоступних зон конструкцій використовують підйомні та підводні різновиди роботів або безпілотні літальні апарати [4]. Крім того, з'явилися технічні рішення щодо створення адаптивних АС, зокрема на основі використання пристроїв технічного зору [15] (див. Куц Ю.В., Шаповалов Є.В., Учанін В.М. та ін. Спосіб адаптивного вихрострумowego контролю. України пат. 140906, 2020, Бюл. № 5 та Учанін В.М., Вертій О.О., Яценко О.Ю. та ін. Адаптивний спосіб сканувального вихрострумowego контролю. України пат. 149803, 2021, Бюл. № 49), АС комплексного НК з використанням різних фізичних методів (наприклад, ультразвукового і ВС) та АС з використанням томографічних принципів [16–18]. Тому є необхідність створення новішої класифікації АСНК на основі розширення переліку класифікаційних ознак.

Загалом можна сказати, що формується тенденція створення багатофункціональних адаптивних АС для вирішення декількох задач, у тому числі на основі реалізації комплексного НК, побудованих на застосуванні різних фізичних принципів для отримання синергетичного ефекту, пов'язаного з обмеженнями кожного окремого методу НК та різною ймовірністю виявлення дефектів залежно від типу та місця розташування [19, 20].

За останні роки сфери використання методів ВС НК, що використовують реакцію матеріалу ОК на зондувальну дію змінного електромагнітного поля, суттєво розширилися [21–23]. Це пов'язано з низкою переваг цього методу порівняно з іншими методами НК. Можна обґрунтовано говорити про високу чутливість ВС методу до дефектів різного типу та його чутливість до низки електрофізичних і геометричних параметрів ОК (багатопараметровість). Але для автоматизації найважливішим є безконтактність ВС методу, тобто здатність забезпечити достатню чутливість до дефектів за певної відстані між ВСП і поверхнею ОК або навіть через діелектричний покрив. При цьому принципове значення має можливість зменшення завад від зміни зазору, тобто відстані між

ВСП і поверхнею ОК під час сканування. Таким вимогам відповідають ВСП подвійного диференціювання, які забезпечують високу чутливість під час контролю з великим зазором [24].

У таблиці зроблено спробу порівняти автоматичний і ручний вихрострумний НК, аналізуючи чинники, що впливають на варіативність сигналу ВСП і, відповідно, достовірність контролю.

Права частина таблиці дає достатньо великий перелік операцій, які повинен реалізувати оператор під час ручного контролю для забезпечення його достовірності. Очевидно, що неточність виконання кожної операції може призвести до порушення оптимального сканування поверхні ОК, хибного налаштування апаратури і, як результат, пропуску дефектів. В АС більшість процедур правої частини таблиці вибираються на етапі попередніх досліджень і реалізуються відповідно до заданих алгоритмів роботи складових АС. Для забезпечення селективності контролю важливо вибрати такі інформативні ознаки сигналів ВСП, що дозволяють достовірно виявляти дефекти в умовах дії завад. Функціонування АС практично не залежить від кваліфікації оператора, стану його здоров'я та умов роботи. Ліва частина таблиці визначає важливість вимог щодо якісної роботи сканерів та пристроїв позиціонування АС. Представлена таблиця підтверджує перспективи автоматизації ВС контролю щодо збільшення достовірності контролю за умови створення надійних сканерів та пристроїв позиціонування.

**Роботизована система вихрострумного НК для виявлення та ідентифікації експлуатаційних дефектів труб печей вторинного риформінгу.** Актуальною проблемою хімічної промисловості є виявлення експлуатаційних тріщин на внутрішній та зовнішній поверхнях труб печей вторинного риформінгу. Труби діаметром 102 мм з товщиною стінки 15 мм виготовляють способом відцентрового виливання з нержавіючої сталі 40X25H20. Контроль необхідно проводити ззовні без доступу до внутрішньої поверхні труб з високою чутливістю до дефектів, що залягають на глибині 7...8 мм (близько 50 % від товщини труб). Задачу ускладнює велика структурна неоднорідність ма-

теріалу труб, яка суттєво зменшує ефективність ультразвукового методу. Тому безальтернативним рішенням задачі є застосування ВС методу з використанням низьких робочих частот. Крім цього, засоби ВС контролю повинні ідентифікувати виявлені дефекти шляхом розділення їх на декілька класів: зокрема, на зовнішні та внутрішні відповідно до поверхні труби, на якій вони зароджуються, а також повздовжні та поперечні відносно осі труби. Крім цього, необхідно оцінювати глибину дефектів (у відсотках від товщини труби) незалежно від того, на якій поверхні вони виявлені. Усі ці завдання необхідно вирішувати в умовах високого рівня завад, які виникають через структурну неоднорідність матеріалу та шорсткість поверхні труби.

Під час розробки ВСП звертали увагу на достатню чутливість до дефектів на внутрішній поверхні труби, рівень сигналів яких повинен перевищувати рівень структурних завад. Для розробки ВСП використано достатньо великі обмотки, розміщені на феритових осердях діаметром 10 мм, що дало можливість завдяки інтегровальним властивостям зменшити рівень структурних завад зі збереженням необхідної чутливості до дефектів. Найкращу чутливість до внутрішніх дефектів забезпечив ВСП типу МДФ 3301 з діаметром робочої площадки 33 мм, який дозволяє проводити ВС контроль в діапазоні робочих частот 50 Гц...150 кГц. ВСП досліджували за допомогою ВС плати EDDYMAX на робочій частоті 1,5 кГц, яка забезпечувала найкращу чутливість до дефектів на внутрішній поверхні труби під час контролю з зовнішньої сторони труби. Використали фрагмент труби, на внутрішній поверхні якої фрезую завтовшки 0,2 мм нанесли три напівеліптичні поздовжні дефекти, що імітують тріщину завдовжки 35 мм і завглибшки 7,5 мм (Д1); 9,0 мм (Д2) і 10,0 мм (Д3), що відповідає глибині залягання 50; 40 і 33,3 % від товщини стінки труби (15 мм) під час контролю з зовнішньої сторони труби [27].

На рис. 1, а, б наведено сигнали від трьох дефектів на внутрішній поверхні труби (Д1, Д2 і Д3) у комплексній площині (після демодуляції), а також вертикальну та горизонтальну складові сигнала

**Чинники, що впливають на варіативність сигналів ВСП під час ручного та автоматизованого ВС контролю**

Автоматизований контроль	Ручний контроль
1. Порушення позиціонування ВСП 2. Порушення швидкості сканування	1. Позиціонування ВСП (зазор, нахил, орієнтація) оператором 2. Параметри сканування поверхні ОК (крок, швидкість тощо) 3. Налаштування приладу (вибір робочої частоти, підсилення, рівень сигналізації дефектів тощо) 4. Відповідність СЗ для налаштування характеристикам ОК 5. Вибір способу інтерпретації сигналів ВСП (наприклад з використанням комплексної площини) 6. Вибір параметрів фільтра високих частот для заглушення впливу завад, пов'язаних зі змінами електрофізичних і геометричних параметрів ОК, впливом краю тощо 7. Вибір параметрів фільтрів низьких частот для заглушення впливу електронних завад відповідно до швидкості сканування 8. Стан здоров'я оператора та стан довкілля

лу ВСП у режимі часової розгортки. На рис. 1, в, з для оцінки можливості виявлення внутрішніх дефектів наведено відповідні сигнали від структурних завад, які отримано шляхом сканування бездефектної зони труби, а також сигнали від зміни зазору, які отримано відведенням ВСП від поверхні труби на відстань більше ніж 3 мм. Сигнали від структурних завад можна спостерігати в комплексній площині (на рис. 1, в виділено пунктирним колом) або в режимі часової розгортки складових сигналів (рис. 1, б). Видно, що сигнал від внутрішнього дефекту типу тріщини (Д1) з глибиною залягання 7,5 мм (50 % від товщини стінки труби) більше ніж на 6 дБ перевищує сигнали від структурних завад.

На рис. 2 наведено сигнали ВСП від поверхневих тріщин різної орієнтації на робочій частоті 1,5 кГц за чутливості на 18 дБ меншої, ніж під час реєстрації сигналів на внутрішній поверхні труби (рис. 1). На рис. 2, а, б наведено сигнали ВСП у комплексній площині і в режимі часової розгортки від поздовжньої відносно осі труби поверхневої тріщини завглибшки 5,0 мм, а на рис. 2, в, з – відповідні сигнали від поперечної тріщини. Дані на рис. 2 свідчать про особливість сигналів ВСП подвійного диференціювання, коли сигнали від поздовжніх і поперечних тріщин мають протилежний напрямок годографів і, відповідно, різ-

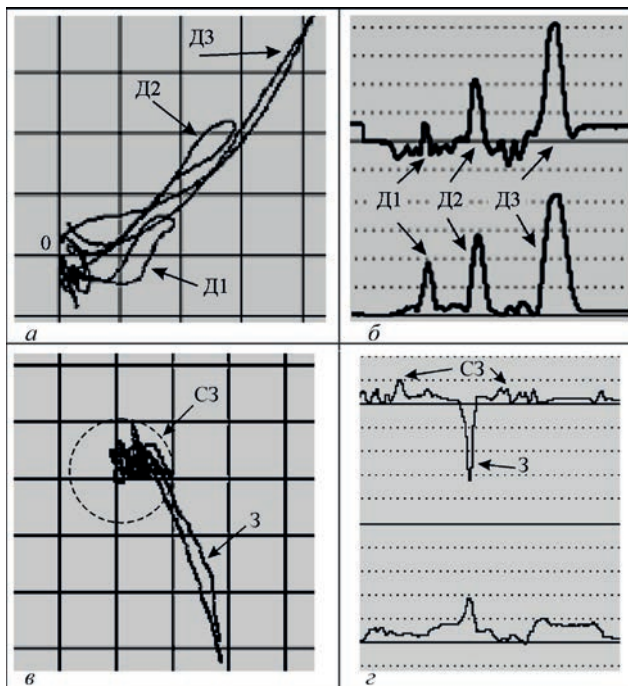


Рис. 1. Сигнали ВСП типу МДФ 3301 від внутрішніх дефектів труби, що залягають на глибині 7,5 (Д1); 6,0 (Д2) і 5,0 мм (Д3), а також сигнали структурних завад (С3) і зміни зазору (3) у комплексній площині (а, в) і складові сигнали ВСП у режимі часової розгортки (б, з)

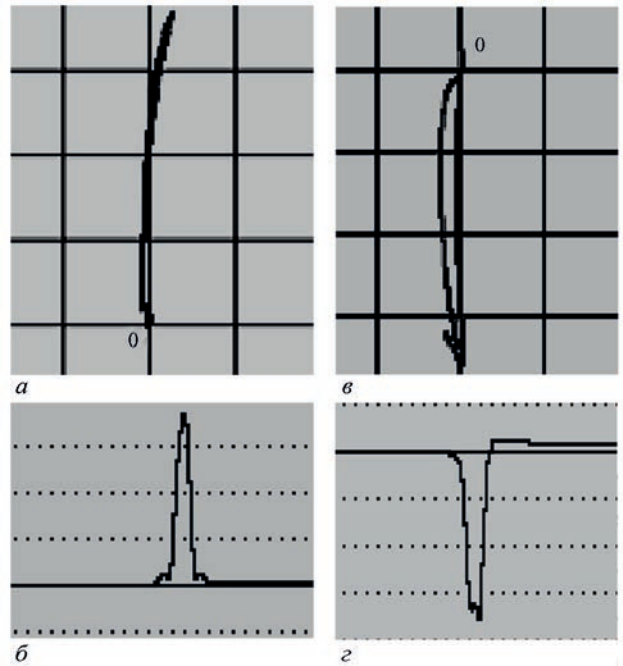


Рис. 2. Сигнали ВСП типу МДФ 3301 від поздовжнього (а, б) і поперечного (в, з) дефектів у комплексній площині (а, в) і в режимі часової розгортки (б, з)

ний знак вертикальної складової. Цю особливість можна використати для ідентифікації виявлених тріщин відповідно до їх напрямку.

Порівняння сигналів від внутрішніх (рис. 1, а, б) та поверхневих (рис. 2) дефектів і сигналів від зміни зазору (рис. 1, в, з) вказує на можливість розрізнення сигналів від дефектів і сигналів від зміни зазору та ідентифікації виявлених дефектів щодо поверхні їх розташування за напрямком годографа (фазовим кутом) сигналу. Зокрема годограф сигналу від дефектів на внутрішній поверхні труби відрізняється від сигналу, обумовленого зазором, на кут  $\sim 90^\circ$ , що дає можливість ефективно виділити його поворотом комплексної площини.

Результати досліджень використано НВФ «Промприлад» для створення роботизованої системи ВС контролю труб вторинного риформінгу типу «КРАБ» [25]. Система «КРАБ» забезпечує 4-х-канальний двочастотний контроль труб в умовах експлуатації. Вона складається з 4-х ВСП, які підключено до 4-х ідентичних ВС каналів, механічного сканера-робота з блоком керування, що забезпечують незалежне сканування поверхні труби усіма ВСП, і індустріального комп'ютера. Спеціально розроблений сканер-робот (рис. 3) забезпечує одночасне переміщення чотирьох ВСП, кожний з яких сканує окремий сектор труби по траєкторії типу меандр. Після контролю однієї ділянки труби з усіх сторін сканер разом з ВСП автоматично переміщується на наступну ділянку. Для побудови сканера використано оригінальні пневматичні механізми, що дозволяє знизити рівень електронних завад завдяки відсутності електродвигунів у зоні ВСП. Швидкість



Рис. 3. Сканер ВС системи «КРАБ», встановлений на трубі печі вторинного риформінгу

переміщення уздовж труби – 1 м/хв. Сканер можна встановлювати на трубу не тільки з торця, а і з її циліндричної поверхні, що дає можливість контролювати вмонтовані труби під час їх ремонту.

Блок керування сканером формує шість сигналів керування, приймає чотири сигнали від виконавчих механізмів сканувального пристрою, а також приймає і обробляє сигнали від датчиків кутових переміщень. Кожний вихрострумний канал обробляє сигнали від одного ВСП на двох робочих частотах 1,4 і 5,0 кГц, необхідних для виявлення та ідентифікації дефектів на різних поверхнях труби. Реєструючи сигнали на різних робочих частотах від кожного ВСП роздільно, можна ідентифікувати дефекти за поверхнею їх розташування. Під час контролю можна спостерігати та реєструвати сигнали від усіх чотирьох ВСП на робочих частотах 1,4 і 5 кГц одночасно (рис. 4). Внутрішні дефекти утворюють сигнал тільки на частоті 1,4 кГц, а зовнішні – як на частоті 1,4 кГц, так і на частоті 5 кГц. Система має можливість реєструвати годограф сигналу ВСП від дефекту у комплексній площині або його складові в режимі часової розгортки. Для реалізації автоматичної сигналізації дефектів (АСД) на кожному з каналів можна виділити у комплексній площині до чотирьох зон реєстрації дефектів. Передбачено можливість будувати розгортку вибраного сектора труби для окремого каналу, а також розгортку всієї труби для внутрішніх або зовнішніх дефектів. Система «КРАБ» забезпечує зберігання всіх зібраних

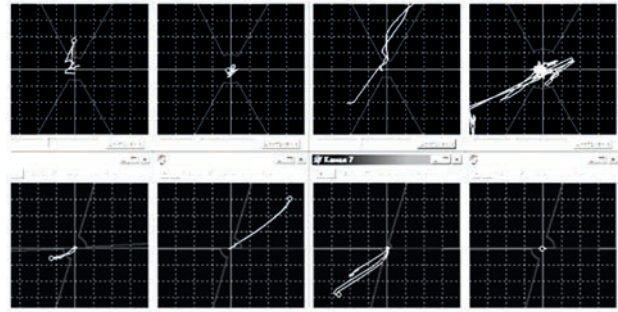


Рис. 4. Сигнали від чотирьох ВСП на робочих частотах 1,4 (зверху) і 5 кГц (знизу)

даних для їх подальшого аналізу і документування та можливість оцінювання глибини виявленого дефекту у відсотках від товщини стінки труби незалежно від його розташування.

Випробування показали, що система «КРАБ» виявляє дефекти на зовнішній поверхні заглибки більше за 20 %, а на внутрішній – більше за 50 % від товщини стінки труби. Система «КРАБ» ідентифікує виявлені дефекти за їх розташуванням (на внутрішній або на зовнішній поверхнях труби) і орієнтацією (поздовжні і поперечні), а також оцінює їх глибини у відсотках від товщини стінки труби.

**Вихрострумний блок багатоканальної автоматизованої системи комплексного контролю залізничних осей.** Ручний контроль залізничних осей з формуванням протоколу результатів контролю кожної осі має низьку продуктивність, що обмежує їх контроль по зонах можливого зародження дефектів. Суттєве підвищення продуктивності та достовірності контролю осей можна досягнути використанням комплексного НК, що обумовлено різною чутливістю вибраних методів НК до окремих груп дефектів. Дефекти залізничних осей можна розділити на дві основні групи: 1) внутрішні, які достатньо добре виявляє ультразвуковий метод; 2) поверхневі, чутливість до яких під час ультразвукового контролю недостатньо висока. У деяких АС під час НК осей ультразвуковий метод поєднують з магнітопорошковим, який забезпечує високу чутливість до поверхневих дефектів, але у той же час має низьку істотних недоліків. Тому перспективнішим для комплексного автоматизованого НК осей є ВС метод. Український НДІ неруйнівного контролю (м. Київ) створив автоматизовану систему комплексного НК залізничних осей «САНК-3», у якій ультразвуковий контроль доповнено ВС методом [26]. Залізничні осі типу РУ1Ш і РУ1 із осьової сталі, які підлягають НК,

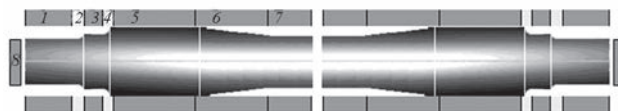


Рис. 5. Схема розподілу залізничної осі на окремі зони контролю

мають досить складну форму (рис. 5). Загальна довжина осі РУ1Ш становить 2216 мм, а осі РУ1 — 2294 мм. Діаметри шийки, біляматочинної частини, маточини і середньої частини осі складають 130; 165; 194 і 172 мм відповідно. Довжини ділянок осі уздовж шийки, біляматочинної частини і маточини осі 190 (для РУ1 — 176), 76 і 250 мм відповідно.

Через складну форму, достатньо велику площу контролю та необхідність забезпечити високу продуктивність поверхню осі розбивають на окремі зони, які контролюють паралельно у багатоканальному режимі. Всього виділено 16 зон контролю (рис. 5). При цьому для контролю зон 1, 3, 5, 6 та 8 використовують по два ВСП, а для сьомої зони — чотири ВСП. Зони 2 і 4 галтелей необхідно контролювати в окремому режимі, оскільки контрольована поверхня тут має невеликий радіус кривизни. Тому для цих зон використовують ВСП з меншим радіусом робочої площадки. Для контролю різних зон залізничних осей використали ВСП двох типів:

– МДФ 0701 з діаметром робочої площадки 7 мм для контролю циліндричних поверхонь, галтелей середньої частини і торців осі (усі зони, окрім другої і четвертої);

– МДФ 0602 з діаметром 6 мм для контролю галтелей малого радіуса (зони 2 і 4 на рис. 5).

Структурна схема вихрострумового блоку автоматизованої системи «САНК-3» (рис. 6) містить 32 ВСП, поділені на дві групи 1.1–1.16 і 2.1–2.16. Кожну групу з 16 ВСП обслуговує два комутатори 3 і 4, які по чергові опитують ВСП. Кожен з комутаторів здатний комутувати до 32 ВСП, які закріплюють в оправках з можливістю сканування поверхні осі з зазором 0,2 мм. Оправки з ВСП у стартовій позиції зображено на рис. 7.

У складі електронного модуля 5 попереднього збору та обробки інформації ОКО-13 використа-

но два вихрострумових блоки (ВСБ) 6 і 7 (рис. 6), кожен з яких обслуговує один комутатор. Модуль ОКО-13 – доопрацьований центральний блок багатоканального дефектоскопа ОКО-01, у якому відсутні дисплей та органи управління. Він може мати в складі до чотирьох ВСБ. Електронний модуль 5 і ВСБ 6 і 7, що підключені до нього, знаходяться в одному корпусі. Модуль 5 оснащений мережевим модулем WizNet для зв'язку з ПК 8, який здійснюється за допомогою стандартного протоколу TCP/IP 4.0. Від ВСБ на плату комутатора надходять сигнал генератора синусоїдальних коливань і код, що відповідає поточному ВСП і каналу. Комутатор активує канал відповідно до отриманого коду і сигнали від вибраного ВСП надходять у ВСБ, де відбувається їх первинна обробка і накопичення. Після завершення контролю ці дані передаються на центральний комп'ютер 8, який їх обробляє та зберігає інформацію про дефектні ділянки у базі даних. Для перевірки роботоздатності і калібрування передбачено вставки зі штучними дефектами, які вмонтовано на СЗ у вигляді спеціальної контрольної осі.

Результати випробувань і експлуатації системи «САНК-3» засвідчили, що ВС контроль із застосуванням ВСП подвійного диференціювання типу МДФ забезпечує достатньо високу чутливість до дефектів. Це дало можливість замінити магніто-

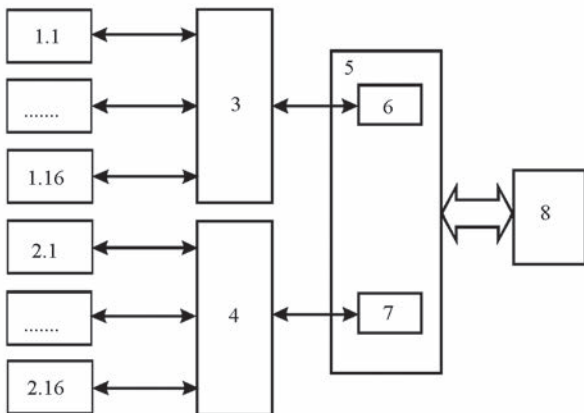


Рис. 6. Схема ВС блоку системи «САНК-3» для комплексного НК осей: 1.1–1.16 і 2.1–2.16 – ВСП; 3 і 4 – комутатори; 5 – електронний модуль ОКО-13; 6 і 7 – вихрострумові блоки; 8 – центральний комп'ютер

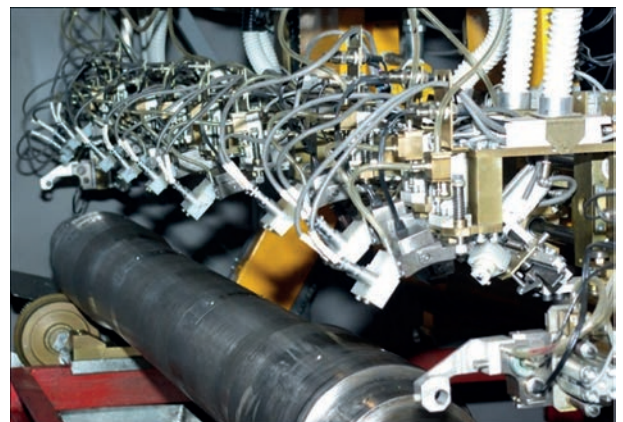


Рис. 7. Автоматизована система «САНК-3» з ВСП на стартовій позиції

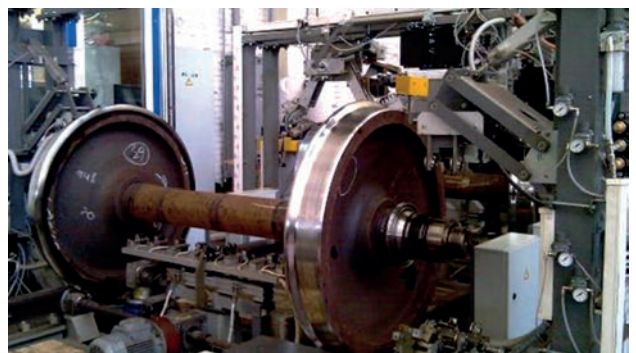


Рис. 8. Автоматизована система комплексного контролю «СНК КП-8» з контрольованою колісною парою

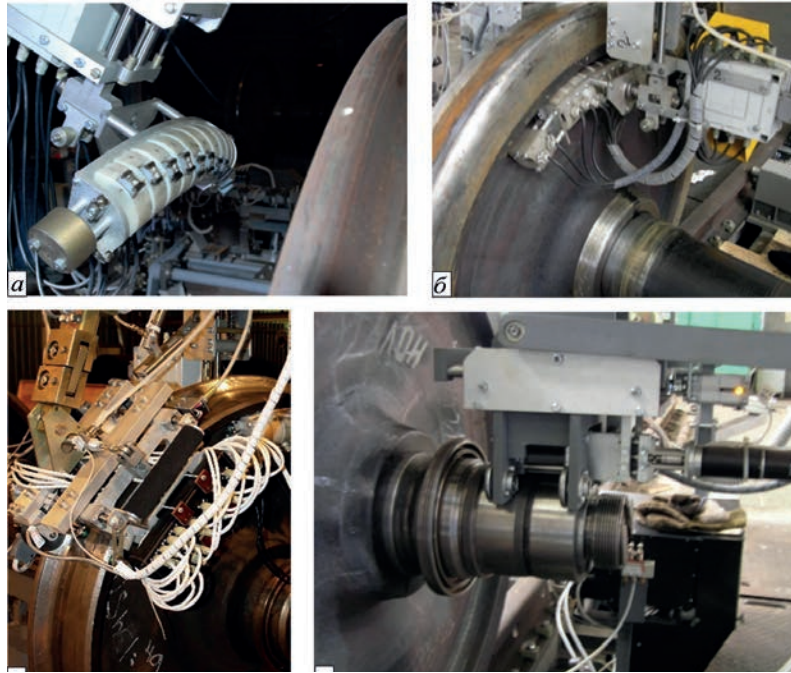


Рис. 9. Сканери АС «СНК КП-8» для контролю галтелей обода колеса у стартовій (а) і робочій позиціях (б), для контролю обода (в) та зони кілець (г)

порошковий метод НК і збільшити продуктивність АС контролю залізничних осей.

**Автоматизована система комплексного неруйнівного контролю колісних пар.** Автоматизовану систему «СНК КП-8» (рис. 8) комплексного (ультразвукового, електромагнітно-акустичного і ВС) контролю колісних пар типу РУ1 і РУ1Ш-957 після тривалої експлуатації розроблено в Українському НДІ неруйнівного контролю (м. Київ) [27].

Вихрострумний тракт АС «СНК КП-8» забезпечує багатоканальний контроль різних зон колісних пар, що гарантує високу продуктивність контролю. В одному з варіантів АС для різних зон колісної пари використано таку кількість ВС каналів: 16 каналів для контролю бічних поверхонь ободу колеса; 6 каналів для контролю поверхні кочення колеса; 9 каналів для контролю гребеня колеса; 24 канали для контролю приободової зони диска; 8 каналів для контролю середньої частини осі; 8 каналів для контролю шийки осі і 10 каналів для контролю внутрішніх кілець підшипників. ВСП подвійного диференціювання використовують для контролю ободу (МДФ 1201), галтелей (МДФ 0601), гребеня (МДФ 0901) і поверхні кочення (МДФ 1201) колеса, середньої частини (МДФ 1201) і шийок (МДФ 0601) осі, а також внутрішніх кілець підшипників (МДФ 0901). На рис. 9 зображено сканери АС «СНК КП-8» для контролю різних зон колісної пари.

Система забезпечує комплексний контроль не менше десяти колісних пар за годину за умови їх ритмічного надходження на позицію контролю. Під час виробничих випробувань і експлуатації автоматизованої системи «СНК КП-8» вихрострумо-

вим методом виявлено дефекти на середніх частинах осей, внутрішніх кільцях підшипників, а також ободах, гребенях, поверхнях кочення і приободових зонах коліс.

**Вихрострумний блок автоматизованої системи комплексного контролю залізничних рейок.** Комплексний НК рейок на етапі їх виробництва передбачений низкою стандартів як важливий чинник забезпечення надійності та безперервності залізничних перевезень. Для достовірного виявлення дефектів рейок найчастіше поєднують ультразвуковий і ВС методи НК, коли синергетичний ефект такого підходу досягається через

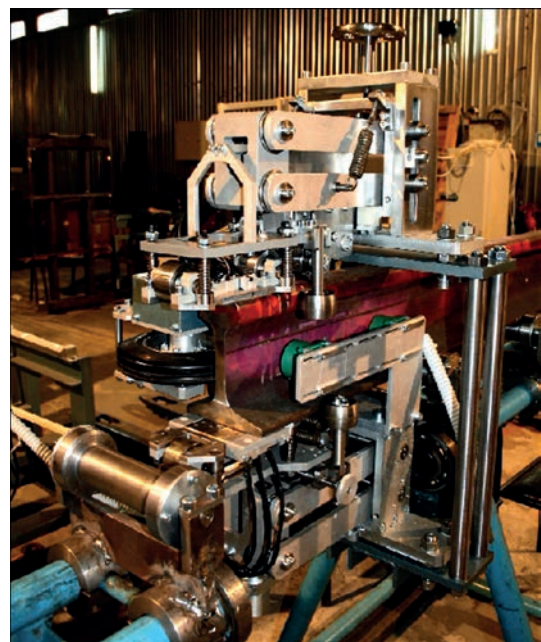


Рис. 10. Загальний вигляд АС комплексного НК рейок після їх прокатування

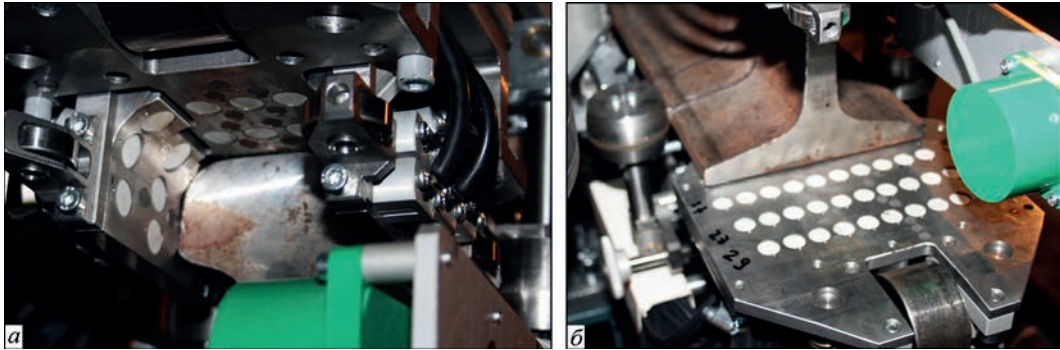


Рис. 11. Комплекти ВСП для контролю головки (а) і підшви (б) рейки

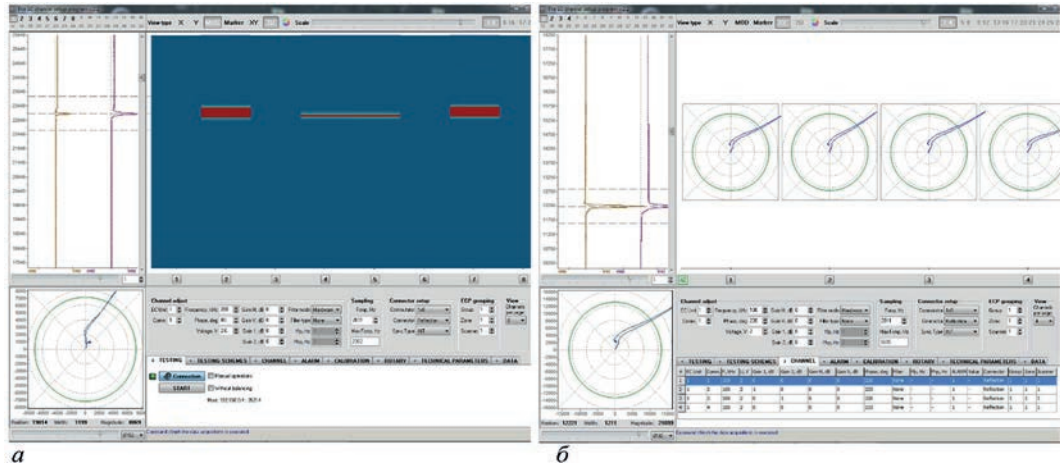


Рис. 12. Дисплей ВС блоку АС із сигналами від дефектів у головці рейки в режимі двокоординатної презентації (а) і в режимі комплексної площини (б)

їх орієнтованість на різні групи дефектів [19, 20]. Для створення селективних ВС систем в умовах дії сильних завад використовують різні варіанти методу, у тому числі з використанням обертових ВСП [28]. Такий підхід може суттєво обмежувати продуктивність ВС контролю та порушити синхронність виробничих циклів, що може призвести до зменшення продуктивності виробництва рейок у цілому. Для збільшення продуктивності НК перспективнішими є багатоканальні АС з використанням селективних ВСП, які можуть проводити контроль в умовах дії великих завад, у тому числі пов'язаних з неоднорідністю магнітних властивостей сталей та нестабільністю зазору між ВСП і поверхнею ОК [29].

Автоматизовану систему для комплексного (ультразвукового, електромагнітно-акустичного і ВС) контролю залізничних рейок після їх прокатування розроблено НВФ «Промприлад» [30].

Розглянемо детальніше ВС блок цієї АС, який забезпечує контроль рейок з продуктивністю до 2 м/с за рахунок використання 56-и каналів [30]. Основні вимоги до ВСП такої АС передбачали високу чутливість по повздовжніх і поперечних тріщин, можливість проводити контроль за умови відстані робочої поверхні ВСП від поверхні рейки не менше ніж 1 мм для запобігання пошкодження ВСП та високий рівень заглушення завад, пов'язаних зі змінами цієї відстані (зазору) під час сканування.

Попередні випробування показали, що цим вимогам відповідає ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1201 з діаметром робочої поверхні 12,5 мм, які забезпечували максимальну чутливість до дефектів у феромагнітній сталі на робочій частоті 100 кГц. Загалом використано 25 ВСП для контролю головки рейок включно з бічними поверхнями (рис. 11, а) та 31 ВСП для контролю підшви рейок (рис. 11, б). ВС блок АС забезпечує виявлення повздовжніх і поперечних тріщин завглибшки більше 1,0 або 1,5 мм завдовжки більше 20 або 10 мм відповідно.

Зовнішній вигляд дисплею ВС модуля АС з візуалізацією результатів контролю в режимах двокоординатної візуалізації (а) і комплексної площини (б) наведено на рис. 12.

### Висновки

Розглянуто стан проблеми щодо створення АСНК. Зазначено формування тенденції розробки адаптивних АС для комплексного НК, побудованих на застосуванні різних фізичних принципів для отримання синергетичного ефекту. Проаналізовано чинники, що впливають на варіативність сигналів ВСП під час ручного та автоматизованого ВС контролю. Зазначено переваги селективних ВСП подвійного диференціювання для створення систем ВС контролю.



Представлено особливості побудови та характеристики розроблених в Україні (НВФ «Промприлад» та Українському НДІ неруйнівного контролю) багатоканальних АС із застосуванням ВС методу, зокрема:

– роботизована чотириканальна система ВС контролю для виявлення та ідентифікації експлуатаційних дефектів труб печей вторинного риформінгу на двох робочих частотах 1,4 і 5,0 кГц зі швидкістю переміщення блоку ВСП уздовж труби 1 м/хв;

– вихрострумний блок багатоканальної (32 канали) АС комплексного контролю залізничних осей під час їх виробництва;

– автоматизована система комплексного НК контролю колісних пар в умовах ремонтних підприємств (різні варіанти мають щонайменше 98 ВС каналів), яка забезпечує можливість НК не менше десяти колісних пар за годину;

– вихрострумний блок АС контролю залізничних рейок під час їх виробництва з продуктивністю до 2 м/с за рахунок використання 56-и каналів, чутливість яких дозволяє виявляти повздовжні та поперечні тріщини завглибшки більше 1,0 або 1,5 мм завдовжки більше 20 або 10 мм відповідно.

### Список літератури/References

1. Meyendorf, N., Heilmann, P., Bond, L. et al. (2020) NDE 4.0 in Manufacturing: Challenges and Opportunities for NDE in the 21<sup>st</sup> Century. *Materials Evaluation*, 78(7), 794–803. DOI: <https://doi.org/10.32548/2020.me-04144>
2. Meyendorf, N., Ida, N., Singh, R., Vrana, J. (2021) *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48200-8\\_43-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48200-8_43-1)
3. Vajpayee, A., Russell, D. (2019) Inspection of Boiler Water Wall Tubes using Electromagnetic Inspection Technique. Yesterday (manual) and Today (automated). *Industrial Eye*, 6(5), 39–43.
4. Bridge, B., Sattar, T., Chen, S., Khalid, A. (1997) On the design of multi-task, compact, climbing robotic NDT systems for remote operation on large surfaces and in hazardous environments. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 13(2), 85–111. DOI: <https://doi.org/10.1080/02780899708953021>
5. Bertovic, M. (2016) A Human Factors Perspective on the Use of Automated Aids in the Evaluation of NDT Data. Proc. 42<sup>nd</sup> annual conf. «Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation», *AIP Conf. Proc.*, 1706, 020003, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4940449>
6. Bertovic, M. (2015) *Human Factors in Non-Destructive Testing (NDT): Risks and Challenges of Mechanised NDT*, Doctoral dissertation, Technical University, Berlin.
7. Орнатский П.П. (1983) *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. Київ, Вища школа. Ornaty, P.P. (1983) Theoretical fundamentals of information-measurement technique. Kyiv, Vyscha Shkola [in Russian].
8. Бабак В.П., Бабак С.В., Єременко В.С. та ін. (2017) *Теоретичні основи інформаційно-вимірвальних систем*. Бабак В.П. (ред.), 2-е вид. Київ, НАУ. Babak, V.P., Babak, S.V., Ieremenko, V.S. et al. (2017) Theoretical fundamentals of information-measurement systems. Ed. by V.P. Babak, 2<sup>nd</sup> Ed. Kyiv, NAU [in Ukrainian].
9. Защепкіна Н.М., Шульга О.В., Наконечний О.А. (2021) *Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірвальних систем*. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Zashchepkina, N.M., Shulga, O.V., Nakonechnyi, O.A. (2021) Metrological support of information-measurement systems. Kyiv, KPI [in Ukrainian].
10. Parasuraman, R., Sheridan, T.B., Wickens, C.D. (2000) A Model for Types and Levels of Human Interaction with Au-

- tomation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics – Part A: Systems and humans*, 30(3), 286–297. DOI: <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
11. Le Liu (2018) The Process to Design an Automation System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1087(4). DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042001>
12. Calhoun, G. (2022) Adaptable (Not Adaptive) Automation: Forefront of Human–Automation Teaming. *Human factors*, 64(2), 269–277. DOI: <https://doi.org/10.1177/00187208211037457>
13. Бобух А.О. (2006) *Автоматизовані системи керування технологічними процесами*. Харків, ХНАМГ. Bobukh, A.O. (2006) *Automated systems of control of technological processes*. Kharkiv, KhNAMG [in Ukrainian].
14. Гурвич А.К., Щербинский В.Г. (2006) Автоматизированный НК металлопродукции. В мире неразрушающего контроля, 3(33), 4–5.
15. Долиненко В., Шаповалов Е., Скуба Т. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумного контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, 5–6, 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
16. Dolinenko, V., Shapovalov, E., Skuba, T. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, 5–6, 51–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.10>
17. Koshovyy, V.V., Nazarchuk, Z.T. (2001) Estimating the Pre-defective State of a Material Using Methods of Ultrasonic Computerized Tomography. *Materials Science*, 37(2), 279–293. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013219011254>
18. Vertiy, O., Uchanin, V. (2021) Three-dimensional visualization of the detected defects by eddy current computing tomography. *The Paton Welding J.*, 9, 49–55. DOI: <http://doi.org/10.37434/tpwj2021.09.08>
19. Tamburrino, A., Rubinacci, G. (2006) Fast methods for quantitative eddy-current tomography of conductive materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(8), 2017–2028. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.877542>
20. Thomas, H.M., Heckel, T., Hanspach, G. (2006) Advantage of a combined Ultrasonic and Eddy Current Examination for Railway Inspection Trains. *9<sup>th</sup> Europ. Conf. on Nondestructive Testing*, Berlin, www.ndt.com.
21. Rockstroh, B., Kappes, W., Walte, F. (2008) Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axles. *17<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive Testing*, Shanghai, www.ndt.com.
22. Libby, H.L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. Wiley-Interscience New York.
23. Терерко А.Я., Назарчук З.Т. (2004) *Селективна вихрострумна дефектоскопія*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка. Teterko, A.Ya., Nazarchuk, Z.T. (2004) *Selective eddy current flaw detection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
24. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11, 2525–2565. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110302525>
25. Uchanin, V.M. (2023) Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J.*, 2, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
26. Uchanin, V., Lutchenko, G., Nikonenko, A. (2006) Automated Eddy Current System for Flaw Detection and Sizing during In-service Stainless Steel Tube Inspection. *Proc. 9<sup>th</sup> Europ. Conf. on Nondestructive Testing*, Berlin, www.ndt.net.
27. Uchanin, V., Lutchenko, G. et al. (2010) The system of automated complex testing of rail axles in their manufacture. *Proc. 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Nondestructive Testing*, Moscow, www.ndt.net.
28. Lutchenko, G., Uchanin, V., Mischenko, V., Opanasenko A. (2012) Eddy Currents Versus Magnetic Particles. *Proc. 18<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive Testing*, Durban, www.ndt.com.
29. Raj, M., Mallik, D., Bansal, S. et al. (2012) Non-Destructive Testing and Inspection of Rails at JSPL – Ensuring Safety and Reliability. *Proc. 18<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive Testing*, Durban, www.ndt.net.

29. Song, Z., Yamada, T., Shitara, H., Takemura, Y. (2011) Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing. *J. of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3(12), 546–550. DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.312082>

30. Opanasenko, A., Iurchenko, A., Lutcenko, G., Uchanin, V. (2016) Eddy Current Multi-Channel Module for In-line High-speed Inspection of Railroad Rails. *19<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive Testing*, Munich, [www.ndt.net](http://www.ndt.net).

## AUTOMATED EDDY CURRENT INSPECTION SYSTEMS WITH SURFACE PROBE OF DOUBLE DIFFERENTIAL TYPE

V.M. Uchanin<sup>1</sup>, G.G. Lutcenko<sup>2</sup>, A.V. Opanasenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

<sup>2</sup>Ukrainian Scientific Institute for Non-Destructive Testing, 8 Naberezhno-Lugova str., 04070, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@ndt.com.ua](mailto:office@ndt.com.ua)

The prospects and state-of-the art related the development of automated non-destructive testing systems are considered. The formation of the tendency concerned with creation of the adaptive automated systems for complex testing based on the application of various physical principles to obtain a synergistic effect is indicated. The factors affecting the variability of eddy current probe signals during the manual and automated eddy current testing were analyzed. The advantages of selective probes of double differential type for automated systems development are indicated. Features of the design and characteristics of multi-channel automated systems based on the eddy current method application developed in Ukraine are presented, in particular: a robotic eddy current testing system for detection and identifying of in-service defects in the tubes of secondary reforming furnaces; the eddy current unit of the multi-channel system of complex testing of railway axles during their production; automated system of complex testing of wheel pairs in the conditions of repair plants; eddy current block of the system for complex inspection of railway rails during their production. 30 Ref., 1 Tabl., 12 Fig.

*Keywords:* automated system, complex non-destructive testing, eddy current defectoscopy, eddy current probe of double differential type

Надійшла до редакції 04.02.2023

## ПЕРЕДПЛАТА 2023

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

\*\* Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агентств «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

*Передплата на електронну версію журналів.*

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

*Передплата через сайт видавництва:*

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.

