

В. О. Нічога¹, І. Н. Прудіус¹, І. В. Сторож¹, В. Г. Сторож¹, Л. В. Ващишин², П. Б. Дуб¹¹Національний університет "Львівська політехніка"²Фізико-механічний інститут Національної академії наук України

МАГНІТОДИНАМІЧНИЙ МЕТОД ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ І НАПРЯМИ ЙОГО МОДЕРНІЗАЦІЇ

© Нічога В. О., Прудіус І. Н., Сторож І. В., Сторож В. Г., Ващишин Л. В., Дуб П. Б., 2016

Розглянуто напрями модернізації інформаційно-діагностичної системи, якою обладнаний Львівський магнітний вагон-дефектоскоп № 442. Для діагностики залізничної колії застосовано магнітодинамічний метод, який має переваги над ультразвуковим методом, що сьогодні дуже широко використовується. Магнітодинамічний метод поширений у Великобританії, Ірані, США та в пострадянських країнах.

На думку авторів статті, у вагоні-дефектоскопі повинна бути повністю замінена намагнічувальна система, тобто замість громіздкої та енерговитратної електромагнітної системи потрібно встановити намагнічувальну систему на основі сучасних потужних постійних магнітів. Однокомпонентна приймальна система на основі інтегральних індукційних сенсорів повинна бути замінена трикомпонентною багатоканальною системою на основі точкових сенсорів Холла. Необхідно розробити нову апаратно-програмну частину нової діагностичної системи збирання, передавання та аналізу дефектоскопічної інформації.

Модернізація Львівського магнітного вагона-дефектоскопа особливо актуальна, оскільки його часто експлуатують в умовах гористої місцевості з крутими поворотами, де спостерігається швидке і суттєве зношення внутрішніх робочих сторін рейок. Ультразвукові методи діагностики тут не працюють через втрату акустичного контакту з рейкою.

Ключові слова: вагон-дефектоскоп, магнітодинамічний метод, дефекти рейок, індукційний сенсор, компоненти поля, інтегральний сенсор, сенсор Холла.

V. Nichoha¹, I. Prudyus¹, I. Storozh¹, V. Storozh¹, L. Vashchyshyn², P. Dub¹¹Lviv Polytechnic National University²Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

THE MAGNETIC FLUX LEAKAGE METHOD OF RAILWAY TRACK DIAGNOSTICS AND WAYS OF IT MODERNIZATION

© Nichoha V., Prudyus I., Storozh I., Storozh V., Vashchyshyn L., Dub P., 2016

Ways of modernization of the information-diagnostics system with which the Lviv magnetic inspection carriage No442 is equipped are considered in the article. The Magnetic Flux Leakage Method (MFLM), that has some advantages over widely used now ultrasonic method, is applied there for rail diagnostics. The Magnetic Flux Leakage Method is used in Great Britain, Iran, USA and the countries of the former USSR.

According to authors' opinion the inspection carriage magnetizing system must be changed totally, that is to say a magnetizing system on the base of modern powerful permanent magnets must be installed instead of the cumbersome and energy expensive electromagnet magnetizing system.

The one-component receiving system on the base of induction sensors must be replaced by the three-component multichannel system on the base of the Hall point sensors.

A new hardware and software parts of the new diagnostics system of collection, transmission and analysis of non-destructive testing information must be elaborated.

It must be noticed that modernization of the Lviv magnetic inspection carriage is an especially actually problem because it functions in many cases in conditions of mountainous area with steep turns where quick and essential wear of the inner working sides of the rails is observed. Ultrasonic methods of diagnostics cannot function here because of loss of acoustic contacts with the rail.

Small high effective multicomponent sensors that can reliably record rail defect magnetic field perturbances in any weather conditions are needed for design of component and multichannel information-diagnostics system for magnetic non-destructive testing which applies inspection carriages.

As a result of theoretical and experimental investigations new two- and three-component sensors are proposed. There are point frame and local ferromagnetic sensors with limited weight and dimensions among them. They guarantee higher sensitivity than now used inspection carriage sensors.

Technique of rail sensors calibration and sensitivity testing is proposed. Such technique has not been used until now.

Point sensors on the basis of the Hall effect, which will be used for elaborating matrix multichannel component rail sensors, were proposed; they were investigated and tested on the specially designed stand.

Key words: inspection carriage, magnetic flux leakage method, rail defects, induction sensor, field components, integral sensor, Hall sensor.

Вступ

Магнітні вагони-дефектоскопи, які використовують магнітодинамічний метод (МДМ) контролю рейок (англійською – Magnetic Flux Leakage (MFL) Rail Inspection), сьогодні дуже широко застосовуються для швидкісного контролю залізничного рейкового шляху і дають змогу в найрізноманітніших кліматичних умовах контролювати верхню частину головки рейки на глибину до 7–8 мм за швидкостей від 20 до 80 км/год.

Цей метод також широко використовують для діагностики технічного стану трубопроводів, резервуарів і сталевих канатів [1, 2].

За даними [3], тепер у країнах, що входили до Радянського Союзу, експлуатується близько ста магнітних вагонів-дефектоскопів (МВД) різних модифікацій та комплектацій. Хоча перші серійні МВД з'явилися на початку 50-х років і весь час удосконалювались, принцип їхньої роботи залишався незмінним: над поверхнею кочення кожної рейки був сильний П-подібний електромагніт з міжполюсною віддаллю 0,8–1 м, який намагнічував рейки в повздовжньому напрямку. Між полюсами електромагніта безпосередньо над поверхнею головки рейки встановлено індукційний сенсор, вісь чутливості якого спрямована вздовж рейки. Під час руху МВД електромагніт і сенсор, які розміщені на спеціальному, так званому індукторному візку, переміщують вздовж рейки; при цьому відбувається намагнічування–розмагнічування контрольованої ділянки рейки.

На рис. 1, 2 наведено загальний вигляд МВД № 442 Львівської залізниці та робочий момент реєстрації сигналів на апаратно-програмному комплексі “Дефектоскоп”, яким оснащений цей вагон.



Рис. 1. Загальний вигляд вагона-дефектоскопа Львівської залізниці



Рис. 2. Запис дефектограми під час роботи вагона-дефектоскопа

За однорідної магнітної структури рейки поле розсіяння над нею в зоні розташування сенсора змінюється незначно, переважно через вплив сталевих підкладок між рейкою і шпалою. В індукційному сенсорі наводиться змінна ЕРС з частотою, яка відповідає частоті появи шпал.

Якщо у верхній частині рейки є порушення однорідності його магнітної структури (наприклад, тріщина або інші дефекти), то поле розсіяння над рейкою в місці цієї неоднорідності значно змінюється. Під час проходження сенсора над цією неоднорідністю в ньому виникає імпульсна ЕРС, за формою якої можна наближено зробити висновок про характер неоднорідності. На рис. 3 подано окремий фрагмент дефектограми з сигналом дефекту, а на рис. 4 показаний індукторний візок Львівського МВД з його намагнічувальною системою (НС).

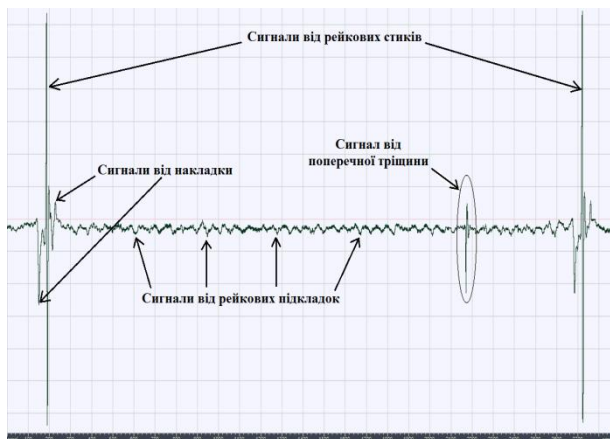


Рис. 3. Дефектограма (сигнал, отриманий під час обстеження залізниці) з сигналом від поперечної тріщини в голівці рейки

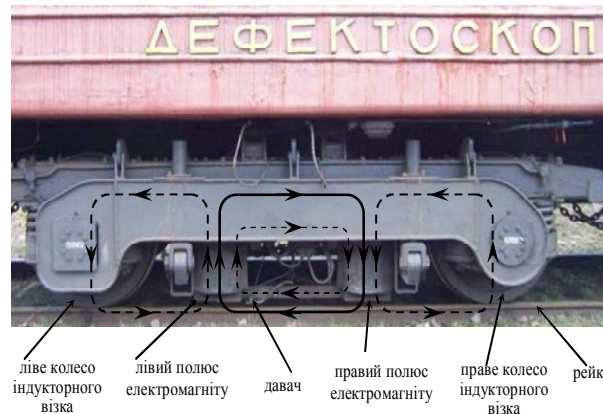


Рис. 4. Намагнічувальна система вагона-дефектоскопа № 442 Львівської залізниці

Особливості МДМ діагностики залізничної колії

МДМ виділяється серед інших методів контролю рейок тим, що завдяки своїм особливостям він придатний для автоматизації розшифрування дефектограм. До таких особливостей належать: висока відтворюваність і повторюваність сигналів дефектів; вигляд сигналів від структурних і неструктурних елементів залізничної колії мало залежить від погодних умов і визначається переважно станом рейок.

Характер сигналів, які формуються під час МДМ контролю рейок, у певному діапазоні швидкостей вагона змінюється незначно, переважно може змінюватись амплітуда сигналу.

Під час повторних заїздів на однакові ділянки колії можна спостерігати динаміку зміни сигналу дефекту.

Дефектограма МДМ контролю рейок добре відображає сигнали від регулярних (структурних) об'єктів рейкового шляху (болтові з'єднання, ізольовані та зварні стики, шпальні підкладки, хрестовини, контррейки тощо), не кажучи про нерегулярні (неструктурні) об'єкти рейок, якими є різні типи сигналів реальних дефектів.

У результаті запису дефектограми певної ділянки колії формується своєрідна топограма рейкового шляху, за якою можна визначати місцеположення вагона, а також аналізувати взаємне положення рейкових ланок по довжині шляху.

Сьогодні у МВД роботу з розшифрування дефектограм виконують досвідчені оператори, які, використовуючи власний накопичений досвід, методом експертних оцінок роблять висновок про характер виявлених неоднорідностей або дефектів. Отримані та записані на дефектоскопі сигнали від об'єктів рейкового шляху дуже часто неявні та неоднозначні, потребують проведення звірянь заїздів та обстеження підозрілих рейок безпосередньо на місці, в натурних умовах. Неякісна інтерпретація результатів контролю іноді зводить нанівець усі переваги магнітного контролю, оскільки його результати дуже часто залежать від суб'єктивного фактора, пов'язаного з кваліфікацією спеціалістів, які здійснюють контроль.

Відомі численні спроби автоматизувати процес розшифрування дефектограм [2, 3, 7, 10, 14, 17, 22], оскільки розвиток сучасної елементної бази і, передусім, обчислювальної техніки дає змогу, в принципі, здійснювати обробку отриманих дефектоскопічних сигналів за алгоритмами різної складності, що в кінцевому результаті дозволило б автоматизувати результати діагностики для усунення суб'єктивного фактора. Але поки що ця проблема ще очікує вирішення і потребує застосування нових методів і способів оброблення сигналів дефектоскопії.

Під час експертної оцінки сигналів на дефектограмі (рис. 3, 5):

- виявляють ймовірні сигнали від рейкових пошкоджень;
- визначають характер пошкоджень за деякими основними ознаками форми сигналів;
- визначають шляхові координати виявлених дефектів.

Розглядаючи імпульсні сигнали на дефектограмі, звертають увагу на:

- ширину імпульсних сигналів від шпальних підкладок – а і б (рис. 5);
- середній рівень сигналу від шпальних підкладок – $2a_n$ (рис. 5), який є опорним для оператора і визначає чутливість магнітного каналу до дефектів;
- всі імпульсні сигнали, амплітуда яких перевищує рівень сигналу від шпальних підкладок a_n втричі ($3a_n$ на рис. 5);
- початковий напрям лінії імпульсу від нульової лінії (за додатний приймаємо імпульс, що починається вгору від нульової лінії);
- амплітуду імпульсів (відносно середнього сигналу від шпальних підкладок – $2a_n$) (рис. 5);
- найбільше відхилення додатної чи від'ємної частин імпульсу від нульової лінії;
- симетрію імпульсу, яка визначається співвідношенням між його від'ємною та додатною частинами;
- ширину імпульсу, яка визначається відстанню між початком та кінцем імпульсу вздовж нульової лінії.

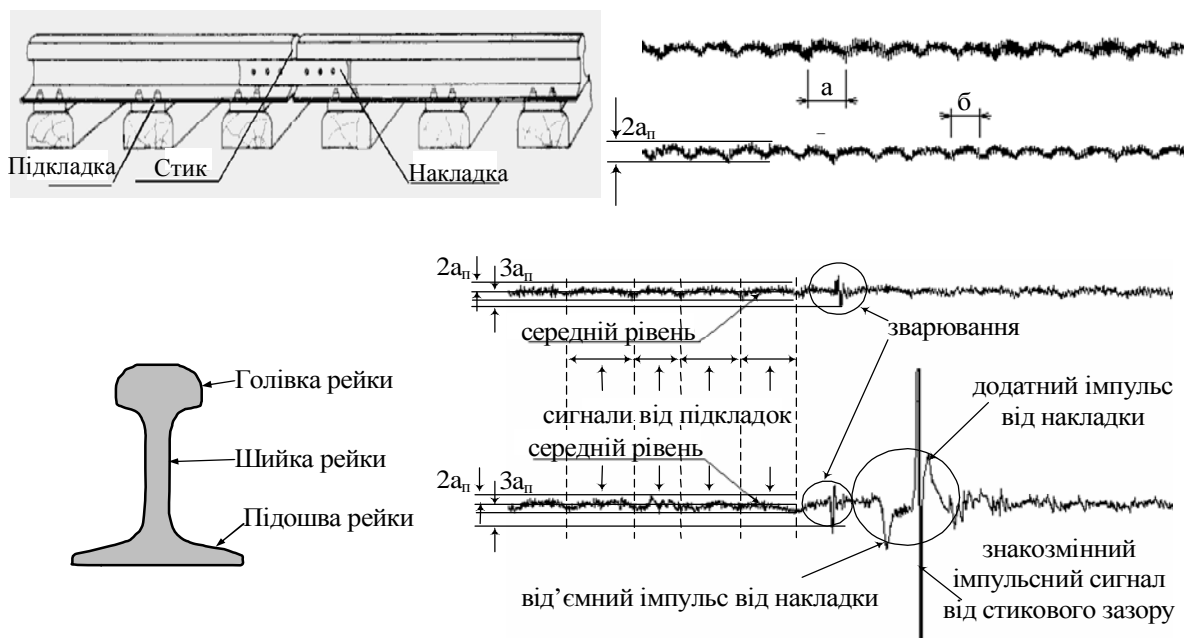


Рис. 5. Елементи рейок залізничної колії та основні образи сигналів від регулярних об'єктів рейкового шляху

Остаточну оцінку виявлених сигналів, подібних до сигналів від дефектів, дають після натурного огляду підозрілих ділянок колії.

Така технологія розшифрування дефектограм істотно знижує швидкість виявлення дефектів. Оскільки альтернативи зберіганню дефектограм у цифровому вигляді немає, а накопичені

матеріали сканування рейок можна зберігати для подальшого перегляду й аналізу, основним напрямом подальшого розвитку рейкової дефектоскопії є збільшення швидкості розшифрування дефектограм з наближенням до режиму автоматизації розшифрування у реальному часі.

Основні переваги мобільної МДМ дефектоскопії порівняно з ультразвуковою полягають у тому, що забезпечується:

- можливість безконтактного контролю рейок із зазором 8–10 мм до поверхні рейки;
- надійність контролю в широкому діапазоні температур повітря і за великої швидкості переміщення вагона-дефектоскопа;
- чітке відображення на дефектограмах елементів рейкового шляху, враховуючи підкладки, що забезпечує точне встановлення положення дефекту;
- відпрацьованість методів розшифрування результатів контролю за типами дефектів.

Запровадження сучасних обчислювальних та інформаційних технологій відкриває широкі можливості щодо модернізації МВД, які були першими мобільними швидкісними засобами дефектоскопії. На нашу думку [3–7], модернізацію слід продовжувати в таких напрямках:

- удосконалення системи намагнічування рейок;
- покращення параметрів сенсорів магнітного поля;
- перехід на компонентні й багатоканальні вимірювання магнітного поля збурення, спричиненого дефектами рейок;
- застосування нових сучасних інформаційних технологій для виявлення, аналізу, опрацювання та класифікації сигналів дефектів.

Розглянемо послідовно кожний з цих напрямів.

Удосконалення системи намагнічування рейок

П-подібна НС Львівського вагона-дефектоскопа має міжполюсну віддаль близько 1 м, а її загальна будова класична для всіх МВД випуску 60–70 років минулого століття. Котушка НС має 1215 витків і в робочому режимі споживає струм 15 А. За розрахунками, які наведені в [25, 26], для П-подібної НС максимальне значення поздовжньої складової магнітної індукції B в центральному шарі головки рейки в статичному режимі, тобто за швидкості вагона $V=0$ км/год (за даними експерименту), становить $B_{\text{екс}} \approx 1,65$ Тл (за розрахунком $B_p \approx 1,5$ Тл). Відповідні значення за швидкості $V=14$ км/год $B_{\text{екс}} \approx 1,6$ Тл, $B_p \approx 1,35$ Тл, за $V=27$ км/год $B_{\text{екс}} \approx 1,3$ Тл, $B_p \approx 1,2$ Тл і т. д. [25, 26].

У [25, 26] показано, що магнітна дефектоскопія вагоном-дефектоскопом забезпечується за магнітного поля в рейці в $15 \div 20$ тисяч E , тобто $1,5 \div 2,0$ Тл. Для рейки типу Р65, яка виготовлена зі сталі М76 і має такі електромагнітні параметри [25, 26]:

- відносна магнітна проникність матеріалу $\mu_m=200$;
- максимальне значення відносної магнітної проникності $\mu_{\text{макс}}=950$;
- коерцитивна сила $H_c=2,5$ А/м;
- залишкова індукція $B_r=1,04$ Тл;
- магнітна індукція насичення $B_s=1,82$ Тл;
- питома електропровідність $\sigma = 3,75 \cdot 10^6$ См/м;
- площа поперечного перерізу головки рейки $S_{\text{гр}} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м²;
- площа повного перерізу рейки $S_p \approx 10 \cdot 10^{-3}$ м²;

магнітний потік у головці рейки $\Phi_{\text{гр}}$ за магнітної індукції $1,5 \div 2,0$ Тл. лежить у межах $4,5\text{--}6,0$ мВб [22, 23].

Вибір таких робочих значень магнітної індукції в досліджуваних рейках і відповідних значень магнітного потоку пояснюється двома причинами.

По-перше, під час магнітної дефектоскопії контрольована рейка мусить бути доведена до стану магнітного насичення, тобто значення магнітної індукції в рейці повинно перевищувати індукцію насичення рейкової сталі B_s . Намагнічування об'єкта контролю до насичення зумовлює наявність потоку розсіяння над ним, при цьому, величина потоку обернено пропорційна до площі перерізу контрольованої дефектної рейки [9]. Отже, зміна магнітної індукції над контрольованою

рейкою дає змогу виявити дефект, а також за формою сигналу, з певною достовірністю, класифікувати його. Проте останнє істотно залежить від кваліфікації оператора і його досвіду.

Через наявність дефекту в рейці в зоні його розташування з'являється додатковий магнітний потік розсіяння над поверхнею рейки, який реєструє сенсор під час сканування вздовж її поверхні. Величина локальної зміни потоку розсіяння залежить від розміру дефекту – площі його поперечного перерізу щодо площі перерізу головки рейки і протяжності дефекту.

По-друге, індукція в контрольованій рейці, яку створює НС вагона, повинна перевищувати максимальне значення залишкової намагніченості різних ділянок рейок [25, 26].

П-подібна НС (див. рис. 6) має певні недоліки, які проявились під час експлуатації вагонів-дефектоскопів.

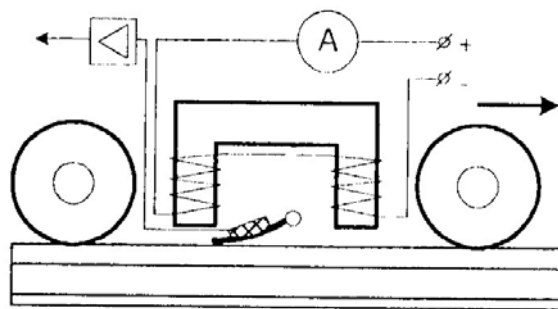


Рис. 6. Функціональна схема класичної П-подібної НС

Ці недоліки, як показано в [27], такі:

1. Наявність повітряного зазору між полюсами магніта і рейкою. Цей зазор призводить до значного послаблення магнітного потоку в рейці, в результаті чого, за чіткої фіксації на дефектограмі конструктивних елементів шляху, внутрішні дефекти рейки можуть не проявлятися.

2. У типових П-подібних НС міжполюсна віддаль всього 80–100 см. У результаті за час проходження НС над дефектом за швидкостей вагона-дефектоскопа 70–80 км/год магнітне поле не встигає проникнути в голівку рейки на достатню глибину.

3. Третій недолік П-подібних НС полягає у значних габаритах електромагніта, який повністю займає міжполюсний простір індукторного візочка і не дає можливості розміщувати сенсори інших дефектоскопічних систем. При цьому така НС споживає велику потужність – до 15 кВт.

Вказані недоліки, певною мірою, вдалося зменшити, застосувавши як осердя НС осі коліс дефектоскопічного (індукторного) візка (рис. 7, а, б) [18].

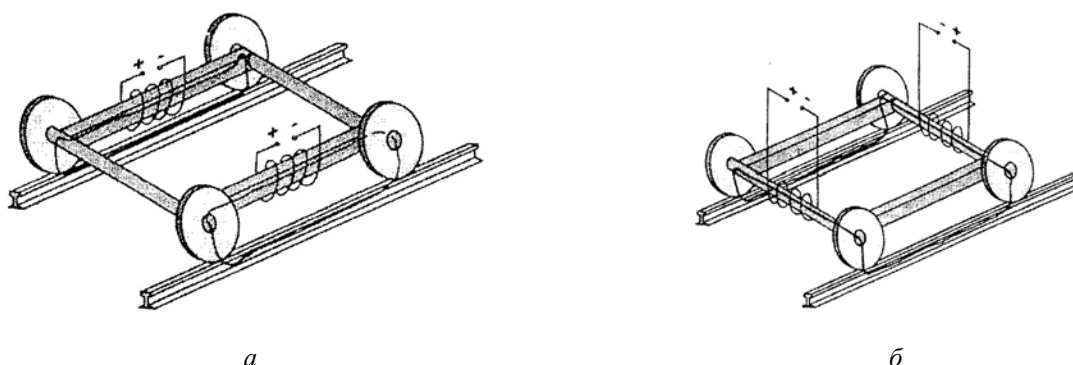


Рис. 7. Індукторний візок з розташуванням НС на: а – поздовжніх балках; б – його осях

Як показано в [18], індукторний візок з НС на поздовжній балці, наведений на рис. 7, а, не забезпечує великого магнітного потоку в голівці рейки. Натомість індукторний візок, зображений на рис. 7, б, дає змогу істотно збільшити магнітний потік у рейці.

Пізніше це було експериментально підтверджено в роботах [2, 26, 27]. Там показано, що НС з магнітопроводом на поздовжній балці за сумарних ампер-витків у робочому режимі в $2 \cdot 10^5$ А·в забезпечує магнітний потік у рейці в 3,81 мВб. Водночас, НС з магнітопроводом на осях колісних пар (рис. 7, б) за $8 \cdot 10^4$ А·в дає можливість отримати 9,49 мВб у рейці.

У цій конструкції індукторного візка міжполюсна віддаль, яка визначається відстанню між колесами візка, збільшена більше ніж утричі й становить 3 м, а полюс НС безпосередньо контактує з головкою рейки. До того ж вдалося вирішити проблему збільшення глибини промагнічування рейки за швидкостей вагона-дефектоскопа до 80 км/год, а розподіл поля поблизу заднього полюса – там, де звичайно встановлюють магнітні сенсори, – залишається практично однорідним по перерізу головки рейки [26, 27].

У суміщеному вагоні-дефектоскопі [26, 27], у якому застосований такий індукторний візок, вдалось отримати магнітну індукцію в рейці, не меншу за 1 Тл, за споживаної електричної потужності НС всього 2 кВт.

Одним з перспективних напрямів модернізації НС вагона-дефектоскопа є застосування потужних постійних магнітів [15]. У [16] описана НС ТзОВ “Полюс-Н”, яка пройшла випробування на Південній залізниці. Ця НС призначена для намагнічування рейок постійним магнітним полем під час швидкісної дефектоскопії. Вона встановлюється на посадочне місце штатних електромагнітів вагонів-дефектоскопів. НС виготовляється із застосуванням постійних магнітів зі сплаву Nd-Fe-B і вмонтована в захисні бокси з нержавіючої сталі. Вона забезпечує магнітний потік у зазорі між полюсом і рейкою типу Р65, не менший, ніж 9 мВб. Конструкція НС передбачає переміщення магнітів усередині захисного боксу для усунення з поверхні магнітів випадково примагнічених предметів.

Покращення параметрів сенсорів магнітного поля і перехід на компонентну і багатоканальну реєстрацію сигналів

У Львівському вагоні-дефектоскопі застосовуються штатні сенсори магнітного поля, які ми умовно назвали ЗД (заводський давач) [4, 5, 21, 25]. У процесі проведення експериментальних досліджень на вагоні-дефектоскопі запропоновано збільшити їх чутливість зі збереженням наявних масо-габаритних параметрів ЗД. Цей модернізований сенсор отримав назву МД (модернізований давач). Електромагнітні параметри сенсорів ЗД і МД наведені в табл. 1 [21]. Основними електричними параметрами індукційних сенсорів типу ЗД і МД є:

- фізична площа сенсора $S_{\phi}=a \cdot b$, де a і b – геометричні розміри поперечного перерізу котушки сенсора;
- еквівалентна площа сенсора $S_{д}=S_{\phi} \cdot w=abw$, де w – кількість витків котушки сенсора;
- магнітний момент сенсора $M=\mu_0 \mu_T S_{д}=\mu_0 \mu_T S_{\phi} w$, де $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_T – відносна магнітна проникність осердя сенсора (для рамочних сенсорів, якими є ЗД і МД, $\mu_T=1$);
- чутливість сенсора щодо магнітного поля $G=\omega M$ (на частотах $f < f_0$, де f_0 – власна резонансна частота ІД).

Враховуючи лінійну залежність чутливості сенсорів ЗД і МД від частоти, для порівняння в табл. 1 наведено значення їх чутливості на частоті 1 кГц. З табл. 1 видно, що чутливість сенсора МД майже вдвічі вища, ніж у ЗД [11, 21].

Таблиця 1

Чутливість індукційних сенсорів

Параметри сенсора	Модернізований сенсор (МД)	Заводський сенсор (ЗД)
Фізична площа S_{ϕ} , м ²	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$
Еквівалентна площа $S_{д}$, м ²	0,115	0,063
Магнітний момент M , Гн·м	$0,14 \cdot 10^{-6}$	$0,08 \cdot 10^{-6}$
Власна резонансна частота f_0 , кГц	186	330
Чутливість по полю G , В/(А/м) на $f=1$ кГц	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$

Під час подальших досліджень з'ясовано, що для детальнішого аналізу та класифікації дефектоскопічних сигналів потрібно використати багатоканальний запис даних розсіяння магнітного дефекту. Може йтися не тільки про реєстрацію позовжньої складової поля дефекту в кількох точках поперечного перерізу рейки, а й про вимірювання вертикальної складової магнітного поля дефекту [21, 26].

Для реєстрації вертикальної складової поля дефекту створено двокомпонентний інтегральний сенсор типу ІДЗ-К2, електричні параметри для кожної компоненти якого ідентичні параметрам сенсора типу МД. На рис. 8, *а, б* показаний зовнішній вигляд сенсорів типу МД (однокомпонентних) і ІДЗ-К2 (двокомпонентних).

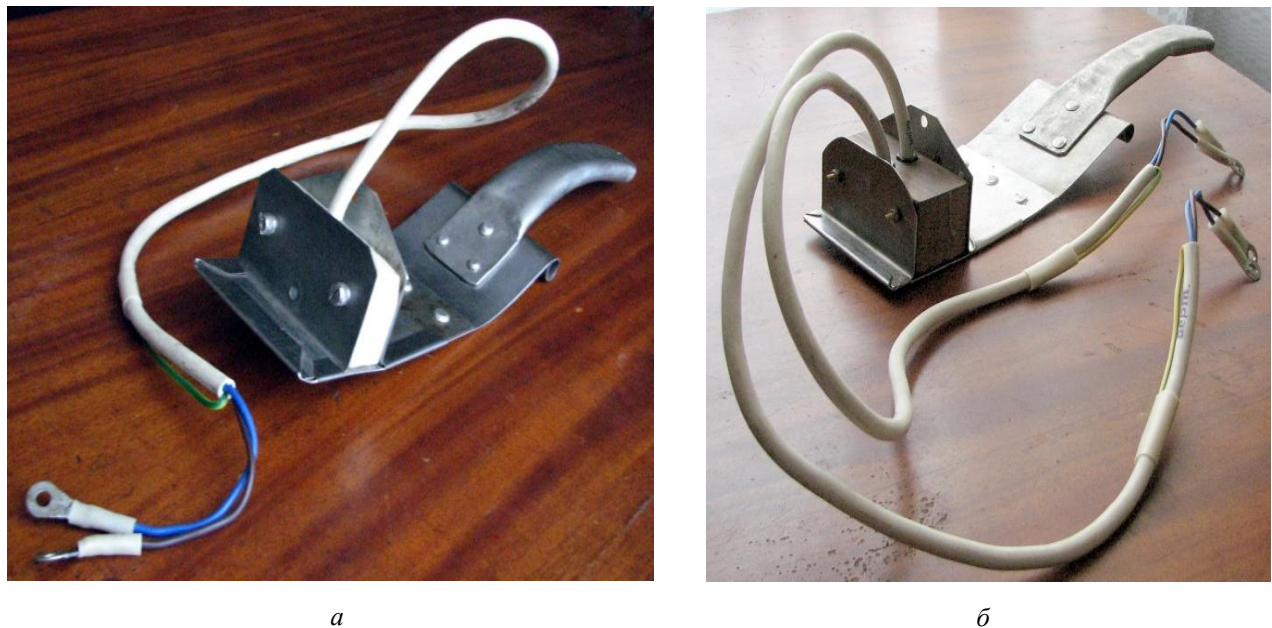


Рис. 8. Сенсор: *а* – МД; *б* – ІДЗ-К2

Натурні випробування сенсора ЗД, однокомпонентного сенсора типу МД і двокомпонентного сенсора типу ІДЗ-К2 проводилися на МВД № 442 Служби колії Львівської залізниці на ділянці колії Львів–Красне протяжністю 50 км [21].

Двокомпонентний сенсор ІДЗ-К2 розміщений на правій пошуковій лижі. Сигнали від компоненти H_y і H_z надходили на два канали штатної апаратури. За результатами випробувань зроблено такі висновки [21]:

1. Розроблені сенсори типу ІДЗ-К2 і МД зареєстрували на досліджуваній ділянці колії всі наявні дефектоскопічні сигнали, а саме: сигнали від болтових стиків, зварних стиків, поверхневих дефектів, шпальних підкладок та сигналів від “упорок”.

2. Зареєстровані сенсорами ІДЗ-К2 і МД за компонентою H_y дефектоскопічні сигнали збігаються з сигналами, які реєструються штатним сенсором вагона-дефектоскопа типу ЗД.

3. Зареєстровані сенсором ІДЗ-К2 за компонентою H_z дефектоскопічні сигнали відповідають за координатою наявним дефектоскопічним сигналам. Водночас образи відомих сигналів, наприклад, “упорка”, зварювання, стик, дещо відрізняються за формою від традиційних, які фіксує вагон-дефектоскоп у штатному режимі.

4. На більшості ділянок шляху сигнал вертикальної компоненти сенсора ІДЗ-К2 не містив високочастотної “шумової” доріжки, що свідчить про його кращий заводозахист. Раніше кращу заводостійкість під час реєстрації вертикальної компоненти сигналу H_z показано теоретично [28].

5. Зазначені висновки підтверджені відповідним актом випробувань, який підписали представники дорожньої лабораторії дефектоскопії та затвердив начальник служби колії Львівської залізниці.

Однокомпонентний сенсор типу МД і двокомпонентний сенсор ІДЗ-К2 є інтегральними сенсорами і їх можна розмістити по одному на кожен рейку.

Значно більший обсяг дефектоскопічної інформації з кожної рейки можна отримати, перейшовши на трикомпонентні сенсори з подальшим застосуванням первинних перетворювачів матричного типу і практичною реалізацією компонентної та багатоканальної приймальної дефектоскопічної системи [8, 21, 31]. Для реалізації таких систем потрібні високоефективні сенсори для реєстрації всіх компонент магнітного поля збурення дефекту. Враховуючи сказане, актуальними є дослідження, спрямовані на створення спеціальних компонентних дефектоскопічних сенсорів, пристосованих для роботи в магнітних каналах вагонів-дефектоскопів.

Отже, для розв'язання задач багатоконтактної та багатоканальної дефектоскопії необхідні точкові сенсори, геометричні розміри яких будуть сумірними з розмірами дефектів, які підлягають виявленню. Такі сенсори можуть бути у певний спосіб розміщені на поверхні рейки, а їх застосування згадується у роботах [31, 32].

Для швидкісної діагностики залізничних рейок МДМ у МВД ми запропонували і створили базові взірці локальних феромагнітних індукційних сенсорів типу ФІД (феромагнітний індукційний давач) і точкових рамкових сенсорів типу ТРД (точковий рамковий давач) [21].

Сенсор типу ФІД використовує феритове осердя з матеріалу НЦ2000; розміри осердя $3 \times 7 \times 34$ мм. Будову сенсора ФІД наведено на рис. 9 [21].

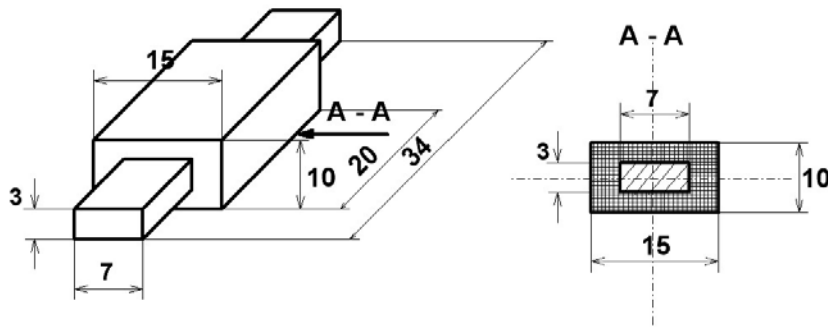


Рис. 9. Будова сенсора типу ФІД

Базовий варіант сенсора – ФІД випробувано на лабораторному стенді з відрізком залізничної рейки і на його основі створено макет лабораторного дефектоскопа з трикомпонентним сенсором для реєстрації H_x , H_y , H_z компонент поля збурення рейки (рис. 10).

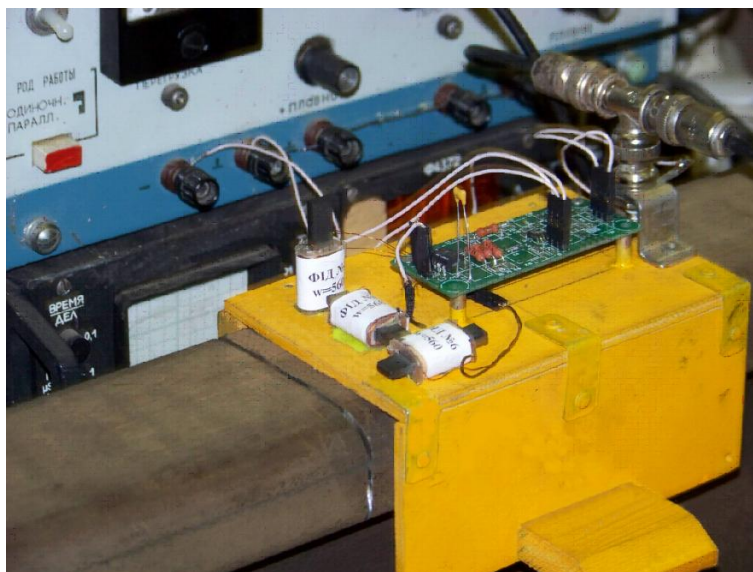


Рис. 10. Пересувна платформа з трьома взаємоортогональними сенсорами типу ФІД і вхідними підсилювачами

Точковий рамковий сенсор типу ТРД являє собою мініатюрну багатовиткову рамку, розміщену на круглому котушковому каркасі (рис. 11) [21].

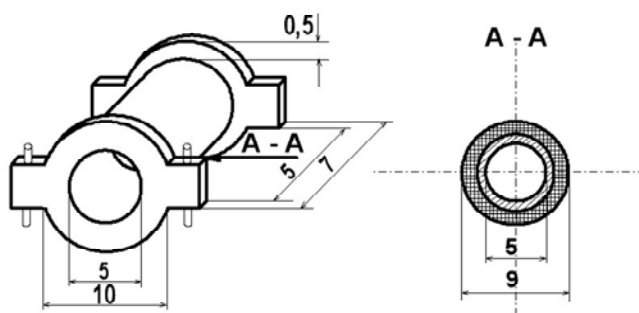


Рис. 11. Конструкція точкового рамкового сенсора типу ТРД

Електричні параметри сенсорів типу ФІД і ТРД подано в табл. 2, а зовнішній вигляд – на рис. 12.

Таблиця 2

Електричні параметри індукційних сенсорів

Параметри сенсора		Фізична площа S_f , м ²	Еквівалентна площа S_d , м ²	Магнітний момент M , Гн·м	Власна резонансна частота f , кГц	Еквівалентна магнітна проникність осердя μ_r	Чутливість по полю на $f=1$ кГц G , В/(А·м)
Тип сенсора	ФІД	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,084	$3,7 \cdot 10^{-6}$	100	34,7	0,023
	ТРД	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,055	$1,75 \cdot 10^{-6}$	150	1	0,011

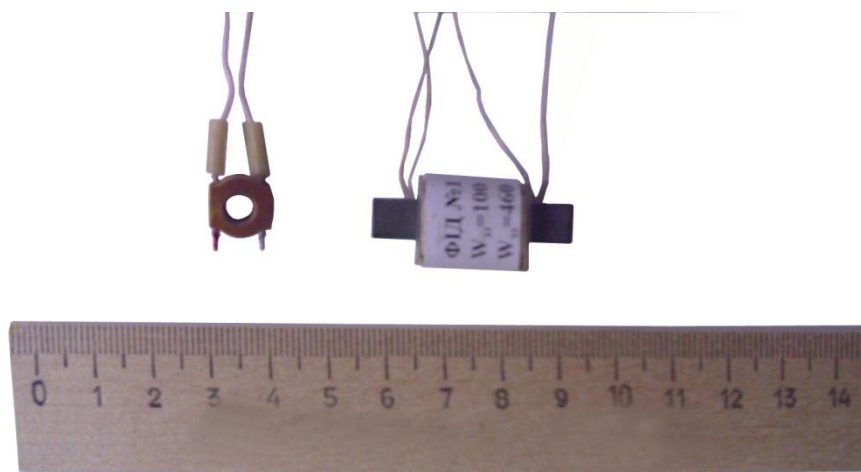


Рис. 12. Сенсори ТРД і ФІД

На основі трьох точкових рамкових сенсорів типу ТРД створено трикомпонентний сенсор для дослідження у лабораторних умовах сигналів дефектів залізничної рейки (рис. 13).

У процесі конструювання магнітних сенсорів через зміну характеристик використовуваних феромагнітних осердь (розкид магнітної проникності), а також через недосконалість методик розрахунків виникає необхідність у проведенні вимірювань деяких параметрів (насамперед чутливості) та визначення АЧХ. Окрім того, вимірювання параметрів сенсорів дає змогу також перевірити коректність поставленої задачі та відповідність потрібним робочим характеристикам під час проведення лабораторних і натурних експериментів.

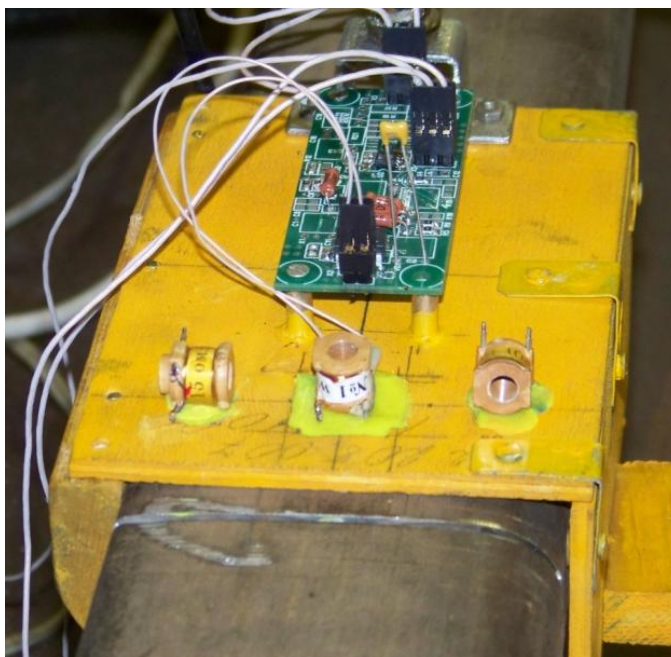


Рис. 13. Лабораторний діагностичний візок на рейці з трьома взємоортогональними точковими сенсорами типу ТРД

Необхідно зауважити, що чутливість усіх перелічених вище сенсорів для магнітної дефектоскопії залізничних рейок визначалась в однорідному магнітному полі кілець Гельмгольца в частотному діапазоні 100–2000 Гц, оскільки спеціальної установки і методики для калібрування сенсорів магнітної рейкової дефектоскопії не існує. Треба зазначити, що запропоновані та наведені електричні параметри сенсорів для швидкісної діагностики залізничної колії у відомій нам літературі взагалі не наведені. Оператори МВД визначають достатність чутливості сенсорів за наявністю на дефектограмі чітких сигналів від шпальних підкладок та рейкових зварок.

Запропоновані та введені нами параметри уможливають порівняння тільки між собою чутливості різних типів сенсорів, зокрема зі штатним інтегральним сенсором (пошуковою котушкою) вагона-дефектоскопа типу ЗД і модернізованим інтегральним сенсором типу МД, оскільки в реальній ситуації чутливість магнітного діагностичного каналу вагона-дефектоскопа суттєво залежатиме від віддалі сенсора до поверхні рейки.

Як показано далі, ми запропонували восьмиканальну систему збирання даних про дефекти залізничної рейки [20]. Така система передбачає розташування на головці рейки восьми точкових сенсорів для запису компонент H_x , восьми – для компонент H_y і восьми – для компонент H_z . Локальні сенсори типу ФІД дають змогу реалізувати тільки триканальну компонентну систему через їхні значні габарити. Збільшення кількості каналів вимагає зменшення розмірів сенсора. Альтернативою локальним феромагнітним індукційним сенсорам типу ФІД можуть бути точкові індукційні сенсори рамкового типу ТРД, описані вище, або точкові сенсори, побудовані на ефекті Холла.

Сенсори на ефекті Холла дають можливість мінімізувати відстань між окремими сенсорами, покращити і розширити АЧХ. Ефективним рішенням є використання сенсорів Холла типу SS49E компанії Honeywell. Ці сенсори мають три виводи: плюс і мінус живлення та вихід сигналу, пропорційного до магнітного поля, котре діє на сенсор. За відсутності зовнішнього магнітного поля на виході встановлюється половина напруги живлення. У разі появи такого поля вихідна напруга збільшується або зменшується залежно від напрямку вектора поля.

Діапазон напруги живлення для SS49E від 3 до 6,5 В. За живлення 5 В він споживає всього 6 мА. Номінальна чутливість – 1,4 мВ/Тс за смуги пропускання від постійної складової до 50 кГц. Динамічний діапазон – $\pm 10^3$ Тс.

Основною перевагою сенсорів Холла є частотнонезалежна АЧХ у робочому діапазоні частот, що унеможливило вплив швидкості їх переміщення на форму сигналу.

Перевірка ефективності застосування сенсорів Холла для реєстрації дефектоскопічних сигналів проводилась у лабораторних умовах на спеціально створеному стенді [21]. Сенсори Холла були встановлені на спільній платі та розміщені на одній осі вздовж зразка з дефектами. Їх взаємна орієнтація забезпечує вимірювання трьох ортогональних складових магнітного поля (рис. 14).

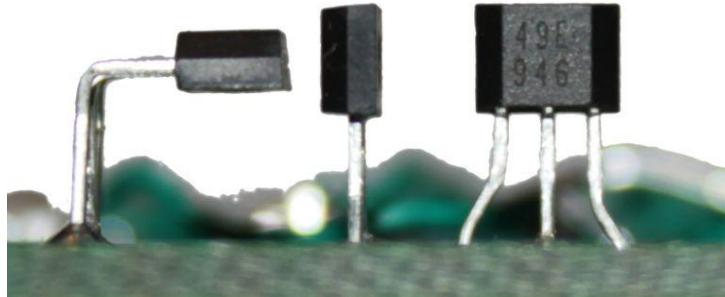


Рис.14. Сенсори Холла розміщені на платі для фіксації ортогональних компонент магнітного поля

Вимушене просторове зміщення між окремими сенсорами компенсувалось програмно. Результати застосування сенсорів Холла для реєстрації дефектоскопічних сигналів позитивні [21], що свідчить про їхню перспективність у практичній реалізації багатоканальної та компонентної інформаційно-діагностичної системи для модернізації Львівського МВД.

Застосування сучасних інформаційних технологій опрацювання сигналів дефектів

Для підвищення інформативності магнітодинамічної системи збирання дефектоскопічної інформації необхідно переходити на компонентну та багатоканальну реєстрацію сигналів. Тому в [6] запропоновано восьмиканальний активний сенсор для магнітної діагностики залізничної колії, структурну схему якого подано на рис. 15, а в [20] – блок спряження багатоканального магнітного дефектоскопа рейок.

Для передавання потоку даних з сенсорів використано Ethernet, який добре зарекомендував себе в організації комп'ютерних мереж і зменшує ризик втрати інформації в системі за рахунок буферизації даних на апаратному рівні. Найпоширенішим сьогодні є так званий режим 100BASE-TX, що забезпечує швидкість передавання даних 100 Мбіт/с по двох витих парах з хвильовим опором 100 Ом. За допомогою Ethernet усі сенсори вагона-дефектоскопа можна об'єднати в одну IP мережу та з'єднати з одним чи декількома комп'ютерами. У результаті отримано гнучку систему, яка дає змогу додавати нові модулі чи замінити вже наявні без змін у інших апаратних частинах.

Якість сигналів, що реєструються, визначається частотою дискретизації. У системі, що експлуатується на Львівському вагоні-дефектоскопі, збір даних відбувається з постійною частотою дискретизації 5 кГц. Однак, залежно від швидкості руху вагона, отримані дані передискретизовуються так, щоб у файлі зберігалися виміри з кроком 1 см вздовж рейки. Такі характеристики вважаються достатніми для візуалізації та виявлення сигналів операторами вагона-дефектоскопа, але недостатні для їх автоматизованої обробки. Для автоматизованого виявлення дефектів розроблено алгоритм на основі вейвлет-перетворення. Розглянемо його.

Як материнську функцію вибрано фрагмент дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини без виходу на поверхню рейки, записаний на ділянці Львів–Сянки–Чоп [29, 30]. Зразок дефектоскопічного сигналу був перемасштабований з метою утворення масиву розтягнутих і стиснутих відносно оригінальної довжини сигналів. Зміна довжин копій сигналів щодо оригінальної становила від 0,5 до 2 разів. Після цього визначено кореляцію фрагмента дефектограми з кожною з цих копій. Для отриманого двовимірного масиву знайдено максимум кореляції як за довжиною дефектограми, так і за

зміню масштабу зразкового сигналу. Коли максимум кореляційної функції попадав на масштаб 1:1, приймалося рішення про наявність дефекту. Кореляція була обчислена за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є з добутку спектрів сигналів, отриманих за допомогою прямого швидкого перетворення Фур'є. Це дає змогу отримувати числовий результат у реальному часі, а отже, може бути використане на вагоні-дефектоскопі в процесі заїзду.

Експериментальне визначення ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги здійснено так. На вхід алгоритму виявлення подається сума відомого сигналу і шуму із заданим співвідношенням сигнал/шум, яке визначалося відношенням піка дефектоскопічного сигналу до амплітуди коливань сигналу від шпальних підкладок. Кожен раз шум брали з випадкового фрагмента реальної дефектограми.

На основі багатьох спроб виявлення у різних реалізаціях шуму для кожного співвідношення сигнал/шум розраховано ймовірність правильного виявлення. Ймовірність хибної тривоги визначалася кількістю підтверджень виявлень сигналу в реалізації шуму, коли насправді цього сигналу не було. На рис. 16 показано характеристики правильного виявлення поперечної тріщини і хибної тривоги для дефекту, записаного вагоном-дефектоскопом на ділянці Львів–Сянки–Чоп, отриманих на основі описаного алгоритму.

Причиною нерівномірного характеру представленої залежності є недостатня якість сигналів, спричинена заниженою частотою дискретизації, та використання для кожного випадку реалізації шуму з випадкового фрагмента реальної дефектограми. Ймовірність правильного виявлення наближається до 100 % у разі перевищення відношення сигнал/шум у чотири рази.

Водночас проведення аналогічного дослідження з використанням сигналу з фізичної моделі дефекту, отриманого на імітаторі рейки, коли просторова дискретизація не перевищувала 1 мм, показало, що ймовірність правильного виявлення наближається до 100 % у разі перевищення відношення сигнал/шум всього вдвічі.

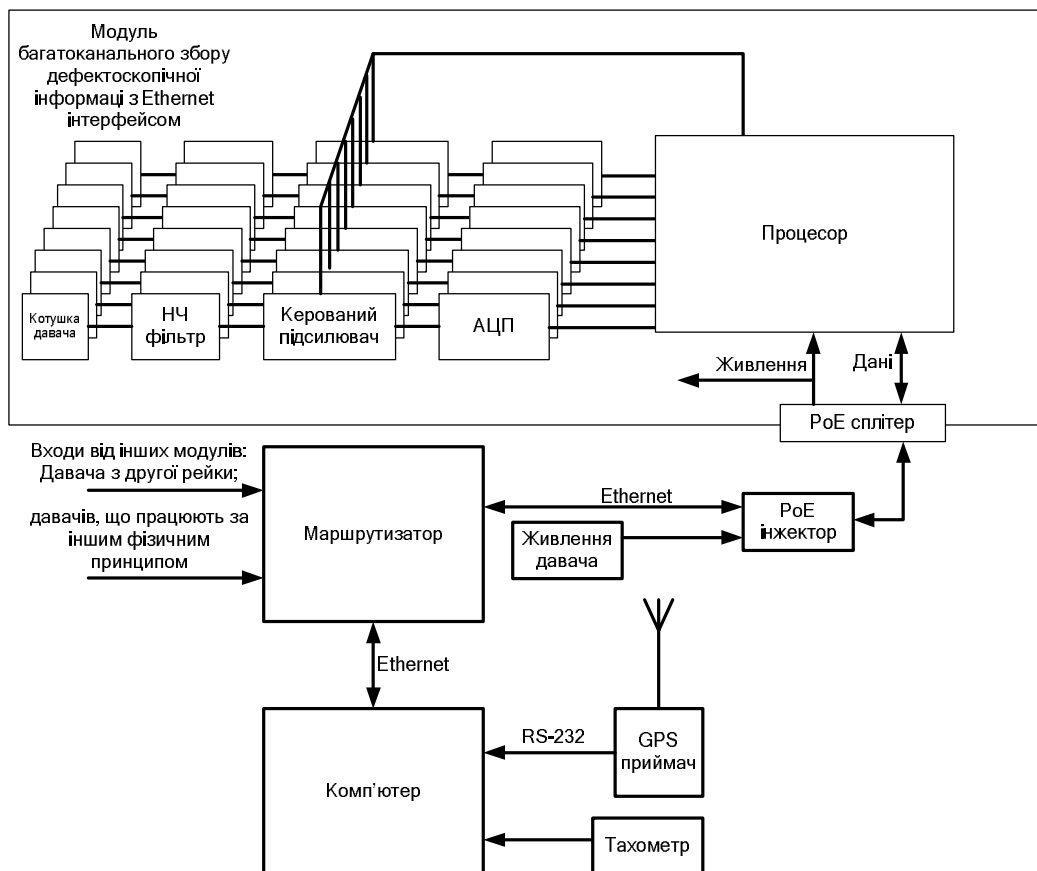


Рис. 15. Структурна схема діагностичної системи на основі восьмиканального активного сенсора для магнітної діагностики залізничної колії [6, 19]

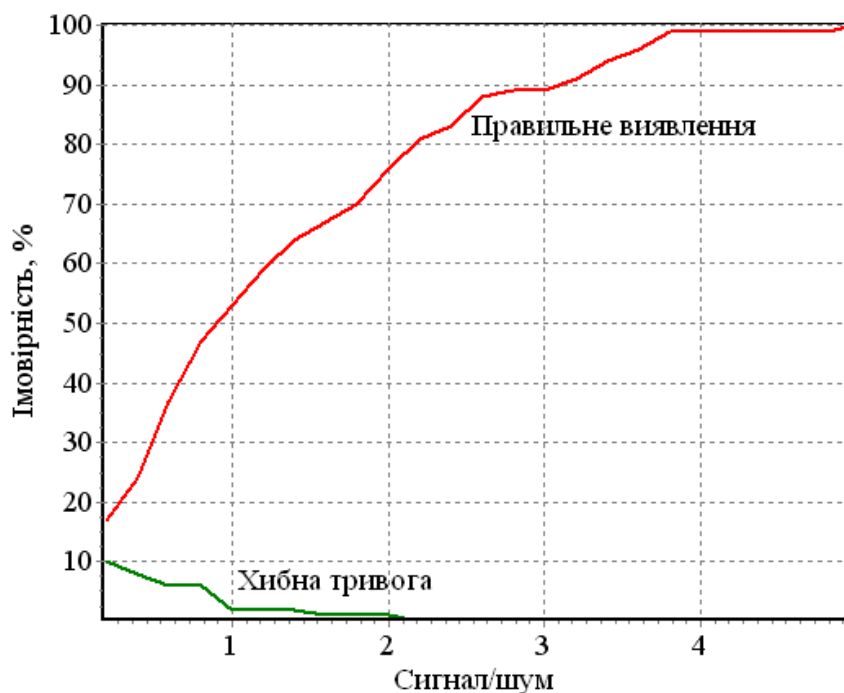


Рис. 16. Залежність ймовірностей правильного виявлення і хибної тривоги від відношення сигнал/шум для дефекту, записаного вагоном-дефектоскопом на ділянці Львів–Сянки–Чоп [19]

Тому для отримання якісного сигналу з сенсорів необхідно використати 12-розрядні АЦП, які працюють з частотою дискретизації до 20 кГц, що забезпечить просторову дискретизацію в 1 мм на швидкості приблизно 70 км/год. Також потрібно врахувати, що для передавання 12 бітів необхідно використати 2 байти, тобто будуть задіяні 16 бітів. Передбачено можливість застосування восьми сенсорів, які будуть розташовані поперек рейки з кроком приблизно 1 см, швидкість передавання даних становитиме $16 \text{ бітів} \times 8 \text{ каналів} \times 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} = 2,56 \text{ Мбіт/с}$. Оскільки технологія Ethernet забезпечує швидкість 100 Мбіт/с, є запас для нарощування кількості вимірювальних каналів за рахунок додаткових пошукових котушок для ортогональних складових збуреного поля і для сенсорів, які працюють за іншими фізичними принципами, наприклад, сенсорів Холла, що підвищить інформативність дефектоскопічної системи і дасть змогу вдосконалити алгоритм виявлення сигналів, спричинених дефектами рейок.

Упровадження нової інформаційно-діагностичної системи на Львівському вагоні-дефектоскопі передбачає застосування сучасних інформаційних технологій для виявлення, аналізу та класифікації сигналів дефектів. Мається на увазі підвищення ефективності опрацювання складних сигналів дефектів і автоматизації розшифрування дефектограм у МДМ методі контролю рейок з використанням вейвлет-перетворень та нейронних мереж [7, 10, 12, 13, 19, 29, 30].

Висновки

1. Розглянуто особливості використання МДМ діагностики залізничної колії на Львівському МВД. Показано основні переваги МДМ діагностики залізничної колії над ультразвуковими методами, які в умовах гористого рельєфу деяких ділянок Львівської залізниці малоефективні, а також мають “мертву зону” у верхній частині головки рейки.

2. Відзначено особливості МДМ контролю залізничних рейок і показано, що саме цей метод найбільше пристосований до автоматизації розшифрування дефектограм, яку сьогодні виконують методом експертних оцінок досвідчені оператори. Однак зазначено, що численні спроби автоматизувати розшифрування дефектограм не привели до успіху, не вдалось позбутися суб'єктивного людського фактора. Ця проблема очікує свого вирішення.

3. Показано, що модернізацію львівського вагона-дефектоскопа необхідно проводити в напрямку: а) вдосконалення системи намагнічування рейок; б) покращення параметрів сенсорів магнітного поля; в) переходу на компонентні й багатоканальні вимірювання магнітного поля збурення, спричиненого дефектами рейок; г) застосування нових сучасних інформаційних технологій для виявлення, аналізу, опрацювання та класифікації сигналів дефектів.

4. Проаналізовано НС рейок у вагонах-дефектоскопах, що застосовують МДМ контролю. Показано основні недоліки цих НС з П-подібним електромагнітом. Визначено основні електромагнітні параметри НС, необхідні для реалізації МДМ контролю. За наявною сьогодні інформацією в магнітних і комбінованих вагонах-дефектоскопах почала застосовуватись НС, яка розташована на осях індукторного візка. Показано, що одним з перспективних напрямів модернізації НС вагонів-дефектоскопів, зокрема львівського, є застосування потужних постійних магнітів зі сплаву Nd-Fe-B. Така НС вже реалізована на Одеській залізниці.

5. Розроблено й експериментально перевірено на вагоні-дефектоскопі одно- і двокомпонентні інтегральні індукційні сенсори типу МД і ІДЗ-К2 підвищеної чутливості. Визначено їхні електромагнітні параметри і зіставлено з відповідними характеристиками штатного інтегрального сенсора типу ЗД.

6. Створено та перевірено в лабораторних умовах локальні феромагнітні сенсори типу ФІД і точкові рамкові сенсори типу ТРД, які використано для побудови макетів трикомпонентних лабораторних дефектоскопів.

7. Запропоновано використати для створення компонентної та багатоканальної інформаційно-діагностичної системи малогабаритні точкові сенсори на основі ефекту Холла. Таку ІДС доцільно використати для модернізації Львівського МВД.

8. Запропонована методика оцінки чутливості сенсорів для швидкісної дефектоскопії МДМ. Зауважимо, що запропонована методика і виміряні на її основі електричні параметри сенсорів у відомій нам літературі взагалі не містяться. Оператори МВД визначають достатність чутливості сенсорів за наявністю на дефектограмі чітких сигналів від шпальних підкладок та рейкових зварок.

9. Розроблена нова система збирання дефектоскопічної інформації на основі компонентної та багатоканальної реєстрації сигналів із застосуванням МДМ контролю рейок. Запропоновано восьмиканальний активний сенсор для магнітної діагностики залізничної колії та його структурну схему. Розроблений блок спряження багатоканального магнітного дефектоскопа рейок, на який отримано патент України на корисну модель. Реалізація цієї нової системи збирання дефектоскопічної інформації на Львівському вагоні-дефектоскопі дасть змогу автоматизувати процес розшифрування дефектограм і підвищити ймовірність виявлення дефектів.

10. Показано, що подальше підвищення ефективності виявлення та класифікації сигналів дефектів і автоматизація розшифрування дефектограм у МДМ контролю рейок можливі із застосуванням для опрацювання сигналів вейвлет-перетворень та нейронних мереж.

1. Wilson J. W., Tian G. Y. 3D Magnetic Field Sensing for Magnetic Flux Leakage Defect Characterisation / *Insight*. Vol. 48. No. 6. P. 357. 2. Марков А. А., Антупов А. Г. Магнитодинамический метод контроля рельсов в вагонах-дефектоскопах / *Путь и путевое хозяйство*. 2012. № 12. С. 9–15. 3. Воробьев В. Н., Шур Е. А. Переход к новому качеству неразрушающего контроля рельсов // *Путь и путевое хозяйство*. 2013. № 10. С. 24–26. 4. Trokhym G., Niczoga V., Dub P. Kierunki rozwoju systemu komputerowego do diagnostyki magnetycznej szyn torow kolejowych / *Wiadomosci Elektrotechniczne*. Rok LXXIX. Warszawa. 2011. No 11. S. 62–63. 5. Трохим Г. Р., Нічога В. О., Дуб П. Б. Аналіз магнітодинамічного дефектоскопа залізничних рейок та шляхи його модернізації / *Відбір і обробка інформації*. 2010. Вип. 33 (109). С. 43–45. 6. Сторож І. В., Нічога В. О. Восьмиканальний активний давач для магнітної діагностики залізничної колії // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2011. Вип. 705. С. 171–175. 7. Niczoga V., Prudyus I., Vashchyshyn L. Modern Method of Processing Signals from Dangerous Defects in the High-Speed Magnetic Rails Flaw / *Politechnika warszawska, Prace naukowe. Transport z.* 98. *Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej*. Warszawa 2013. S. 483–490.

8. Нічога В. О., Дуб П. Б. Особливості застосування багатоканальної і багатокомпонентної дефектоскопії при обстеженні залізничних рейок магнітними методами / Матер. 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів” (ЛЕОТЕСТ-2011). 21–26 лютого 2011 р., Славське Львівської області. С. 131–133.

9. Особливості виявлення дефектів рейок магнітним і ультразвуковим вагонами-дефектоскопами в умовах Львівської залізниці / В. О. Нічога, М. В. Сім’яновський, І. С. Кучма, Г. Р. Трохим // Відбір і обробка інформації. 2011. Вип. 34 (110). С. 42–48.

10. Niczoga V., Romanyshyn Yu. Computer Processing of Signals of Railroad Rail Magnetic Flaw Detection / IX szkola-konferencja “Metrologia wspomagana komputerowo”. 24–27 maja 2011. Waplewo, Poska. S. 89.

11. Nichoga V., Pronenko V. Miniature Induction Sensors for Scientific Research and Objects Diagnostics Proceedings of the XIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET’2012) Dedicated to the 60th anniversary of the Radio Department at the Lviv Polytechnic National University. February 21–24, 2012. Lviv–Slavske, Ukraine. Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. P. 130.

12. Nichoga V., Storozh I., Vashchyshyn L. Model of Rail Crack Based on a Discrete Set of Loops with Current / Diagnostyka. Vol. 14. No. 2. PTDT. Warszawa. 2013. S. 67–71.

13. Nichoga V., Vashchyshyn L. Continuous Wavelet Transform of Railway Track Defectoscopic Signals in the Matlab Wavelet Toolbox / Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika. Vol. LXIII. No. 4. 2014. S. 1–7.

14. Nichoga V., Vashchyshyn L. Wavelet-neural Network for Detection Signals from Transverse Cracks in the Rail Head / Proceedings 2015. 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). Lviv. Ukraine. September 2–5, 2015. S.132–134.

15. Мережин Н. И., Максимов М. Н., Легин А. А. Экспериментальные исследования системы намагничивания рельсов с использованием постоянных магнитов / Известия ЮФУ. Техн. науки. Ноябрь 2014. № 11 (160). С. 135–145.

16. Намагничивающая система. ООО НПФ “Полюс-Н” URL: <http://www.polus-n.com/defectoscop.html>.

17. Nichoha V. Integral, Local and Point Sensors for Magnetic Diagnostics of Technical Condition of Track Rail / V. Nichoha, P. Dub, I. Storozh // XII-th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET’2014) 21 February – 1 March 2014. Lviv–Slavske, Ukraine. P. 164–166.

18. Rail Inspection Technologies URL: <http://www.innotrak.net-IMG-pdf-d441-pdf>.

19. Цветков Ф. А. Основы автоматизации расшифровки дефектограм магнитного вагона-дефектоскопа // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. 2000. Т. 15. № 1. С. 14–18.

20. Пат. 77065 UA Україна, МПК G11B 20/10. Блок спряження багатоканального магнітного дефектоскопу рейок / В. О. Нічога, І. В. Сторож; заявник і власник патенту Нац. ун-т “Львів. політехніка”. № u201208870; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2.

21. Нічога В. О., Дуб П. Б., Сторож І. В. Компонентні давачі для магнітної діагностики технічного стану рейок залізничної колії // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2014. № 3. С. 34–43.

22. Королев М. Ю. Расчетные модели для оценки сигналов от объектов пути при магнитодинамическом методе НК рельсов // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 4 (18). С. 72–73.

23. Королев М. Ю. Магнитодинамический метод контроля рельсов. Методология расчета полей и сигналов: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2003. 26 с.

24. Вагон-дефектоскоп магнитный. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: Проектно-технологическо-конструкторское бюро Главного управления пути Министерства путей сообщения, 1979. 109 с.

25. Вагон-дефектоскоп с компьютерной системой регистрации сигналов контроля состояния рельсов. Рекламный проспект. К.: ПКФ “Логи+ка”. 1997. 5 с.

26. Антипов А. Г., Марков А. А. Автоматизация анализа сигналов магнитодинамического контроля рельсов // В мире неразрушающего контроля 2(64), июнь 2014. С. 25–30.

27. Марков А. А., Антипов А. Г. Магнитодинамический метод контроля // В мире неразрушающего контроля 3(57). Сентябрь 2012. С. 66–71.

28. Нічога В. О., Дуб П. Б. Вимірювання рейкових струмів вертикально орієнтованими індукційними давачами // Відбір і обробка інформації. 2003. Вип. 19 (95). С. 78–82.

29. Нічога В. О., Іванчук В. М., Сторож І. В. Передискретизовані зразки експериментальних сигналів як базис для аналізу сигналів дефектоскопії залізничних рейок // Радіоелектроніка та телекомунікації: [зб. наук. пр.]. Львів. 2010. С. 26–29. (Вісник Нац. ун-ту “Львів. політехніка”; № 680).

30. Сторож І. В.,

Нічога В. О., Ващишин Л. В. Застосування модельованих і адаптованих сигналів як базису для вейвлет-подібного аналізу сигналів магнітної дефектоскопії залізничних рейок // Перспективні комп'ютерні, управляючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України: матеріали 25-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 24–29 верес. 2012 р., м. Алушта. Крим, Україна : прилож. к журн. “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”. 2012. № 4. С. 12–14. 31. Перспективи використання багатокomпонентної дефектоскопії при магнітодинамічній діагностиці рейок залізничної колії / В. О. Нічога, Г. Р. Трохим, І. В. Сторож, І. С. Кучма // Тези VI Міжнародної науково-технічної конференції “Україна у європейському просторі. Проблеми бізнесу, політики, права”. Львівський університет бізнесу і права. 29–30 квітня 2010 року. Львів. С. 246–248. 32. Using AC Field Measurement Data at an Arbitrary Liftoff Distance to Size Long Surface-breaking Cracks in Ferrous Metals / R. K. Amineh, M. Ravan, S. H. Hesam Sadeghi, R. Moini // *NDT&E International* 41. 2008. P. 169–177.

References

1. Wilson, J. W. and Tian, G. Y., *3D Magnetic Field Sensing for Magnetic Flux Leakage Defect Characterisation*, *Insight*, Vol 48, No 6, p. 357 June 2006.
2. Markov A. A. *Magnetic Flux Leakage Method of Rail Inspection in Inspection Carriages (in Russian)* / A. A. Markov, A. G. Antipov // *Track and Track Equipments* No 12, 2012. – P. 9–15.
3. Vorobyev V. N. *Transition to New Quality of Non-destructive Testing (in Russian)* / V. N. Vorobyev, Ye. A. Shur // *Track and Track Equipments* No 10, 2013, P.24–26.
4. Trokhym G. *Kierunki rozwoju systemu komputerowego do diagnostyki magnetycznej szyn torow kolejowych* / G. Trokhym, V. Niczoga, P. Dub // *Wiadomosci Elektrotechniczne, Rok LXXIX, 2011, No 11, Warszawa, Polska.* – S. 62–63.
5. Trokhym G. R. *Analysis of Magnetic Flux Defectoscop of Rails and Ways of It Modernization* / G. R. Trokhym, V. O. Nichoha, P. B. Dub // *Extraction and Processing of Information (in Ukrainian)* – 2010. – No 33 (109). – P.43–45.
6. Storozh I. V. *Eight Channel Active Sensor for Magnetic Diagnostics of Railway Track* / I. V. Storozh, V. O. Nichoha // *Bulletin of Lviv Polytechnic National University (in Ukrainian), No 705: Radioelectronics and Telecommunications, 2011.* – P. 171–175.
7. Nichoga V. *Modern Method of Processing Signals from Dangerous Defects in the High-Speed Magnetic Rails Flaw* / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // *Politechnika warszawska, Prace naukowe, Transport z. 98, Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, Warszawa 2013, S. 483–490.*
8. Nichoha V. O. *Peculiarities of Use of Multichannel and Manycomponent Diagnostics in Rail Inspection Magnetic Methods* / V. O. Nichoha, P. B. Dub // *Proceedings of 16 International Scientific-practical Conference “Electromagnetic and Acoustic Methods of Non-destructive Testing of Materials and Products” (LEOTEST-2011) (in Ukrainian).* – 21–26 February 2011, Slavske, Lviv Region. – P. 131–133.
9. Nichoha V. O. *Peculiarities of Detection of Rail Defects by Magnetic and Ultrasonic Inspection Carriages in Conditions of Lviv Railway* / V. O. Nichoha, M. V. Simyanovskiy, I. S. Kuchma, G. R. Trokhym // *Extraction and Processing of Information (in Ukrainian)* – 2011. – No 34 (110). – P. 42–48.
10. Niczoga V. *Computer Processing of Signals of Railroad Rail Magnetic Flaw Detection* / V. Niczoga, Yu. Romanyshyn // *IX szkola-konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo”, 24–27 maja 2011, Waplewo, Poska.* – S. 89.
11. Nichoga V. *Miniature Induction Sensors for Scientific Research and Objects Diagnostics* / V. Nichoga, Pronenko V. // *Proceedings of the XIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012) Dedicated to the 60th anniversary of the Radio Department at the Lviv Polytechnic National University – February 21–24, 2012.* – Lviv–Slavske, Ukraine. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. – P. 130.
12. Nichoga V. *Model of Rail Crack Based on a Discrete Set of Loops with Current* / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // *Diagnostyka, Vol.14, No 2, PTDT, Warsawa, 2013, S. 67–71.*
13. Nichoga V. *Continuous Wavelet Transform of Railway Track Defectoscopic Signals in the Matlab Wavelet Toolbox* / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika, Vol.LXIII, No.4, 2014.* – S. 1–7.
14. Nichoga V. *Wavelet-neural Network for Detection Signals from Transverse Cracks in the Rail Head* / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Proceedings 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, September 2–5,*

2015– S.132–134. 15. Merezhin N. I. *Experimental Investigations of Rail Magnetization System with Using Permanent Magnets* / N. I. Merezhin, M. N. Maksimov, A. A. Legin // *Proceedings of SFU. Technical Sciences. (in Russian)* No 11 (160), November 2014. – P. 135–145. 16. *Magnetizing System. OOO NPF "Polus-N". (in Russian):* <http://www.polus-n.com/defectoscop.html>. 17. Nichoha V. *Integral, Local and Point Sensors for Magnetic Diagnostics of Technical Condition of Track Raili* / V. Nichoha, P. Dub, I. Storozh // *XII-th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014)* 21 February – 1 March 2014. – Lviv–Slavske, Ukraine. P. 164–166. 18. *Rail Inspection Technologies:* <http://www.innotrak.net-IMG-pdf-d441-pdf>. 19. Tsvetkov F. A. *Fundamentals of Automatisation of Defectogram Decoding in the Magnetic Inspection Carriage* / F. A. Tsvetkov // *Proceedings of Taganrog State Radiotechnic University, (in Russian)* 2000, Vol 15, No 1, P.14–18. 20. Patent 77065 UA Ukraine, IPC G11B 20/10. *Match Block of Multichannel Magnetic Rail Defectoscop (in Ukrainian)* / V. O. Nichoha, I. V. Storozh; Patent owner – Lviv Polytechnic National Univeresity – No u201208870; Publ. 25.01.2013, Bull. No. 2. 21. Nichoha V. O. *Component Sensors for Magnetic Diagnostics of Technical Condition of Railway Track Rails* / V. O. Nichoha, P. B. Dub, I. V. Storozh // *Information-control Systems on Railway Transport (in Ukrainian)*. 2014. No. 3. – P. 34–43. 22. Koroliiov M. Yu. *Calculation Models for Estimating Signals from Track Objects in Magnetic Flux Leakage Method of Rail Non-destructive Testing* / M. Yu. Koroliiov // *In the World of Non-destructive Testing (in Russian)*. – 2002. – No 4 (18). – P. 72–73. 23. Koroliiov M. Yu. *Magnetic Flux Leakage Method of Rail Inspection. Methodology of Field and Signal Calculation: Thesis for the candidate degree in technical sciences (in Russian)* / M. Yu. Koroliiov / Sankt-Petersburg, 2003. – 26 p. 24. *Magnetic Inspection Carriage. Technical Description and Instruction of Exploitation. (in Russian)* – Moscow: Project-technology-construction Office of the Main Track Department of the Communication Ministry, 1979. – 109 p. 25. *Inspection Carriage with Computer System of Rail Condition Inspection Signals Registratin. Publicity Prospects (in Russian)* – Kyiv: PKF "Lohi+ka", 1997. 5 p. 26. Antipov A. G. *Automatization of Signal Analysis in Magnetic Flux Leakage Method of Rail Inspection* / A. G. Antipov, A. A. Markov // *In the World of Non-destructive Testing (in Russian)*. No 2(64), June 2014. – P. 25–30. 27. Markov A. A. *Magnetic Flux Leakage Method of Inspection* / A. A. Markov, A. G. Antipov // *In the World of Non-destructive Testing (in Russian)*. No 3(57), Sept 2012. – P. 66–71. 28. Nichoha V. O. *Measuring Rail Currents by Vertically Oriented Induction Sensors* / V. O. Nichoha, P. B. Dub // *Extraction and Processing of Information (in Ukrainian)* – 2003. – No 19 (95). – P. 78–82. 29. Nichoha V. O. *Redigitized Examples of Experimental Signals as a Basis for Analysis of Rail Non-destructive Testing Signals* / V. O. Nichoha, V. M. Ivanchuk, I. V. Storozh // *Bulletin of Lviv Polytechnic National University (in Ukrainian)*, No 680: *Radioelectronics and Telecommunications*, 2010. – P. 26–29. 30. Storozh I. V. *Application of Modeled and Adapted Signals as a Basis for Wavelet Like Analysis of Rail Non-destructive Testing Signals* / I. V. Storozh, V. O. Nichoha, L. V. Vashchyshyn // *Proceedings of 25th International Scientific-practical Conference on Perspective Computer, Control and Telecommunication Systems for Railway Transport of Ukraine (in Ukrainian)*, 24–29 Sept. 2012, Alushta, Crimea, Ukraine. Appendix to the *Journal of Information-control Systems at Railway Transport*. – 2012. – No 4. – P. 12–14. 31. Nichoha V. O. *Perspectives of Using Multichannel Non-destructive Testing of Railway Track Rails Diagnostics* / V. O. Nichoha, G. R. Trokhym, I. V. Storozh, I. S. Kuchma // *Absrtract of VI International Міжнародної Science and Practical Conference "Ukraine in the European Space. Problems of Business, Politics and Law"*. – Lviv University of Business and Law. Lviv. 29–30 April 2010. – P. 246–248. 32. Amineh R. K. *Using AC Field Measurement Data at an Arbitrary Liftoff Distance to Size Long Surface-breaking Cracks in Ferrous Metals* / R. K. Amineh, M. Ravan, S. H. Hesam Sadeghi, R. Moini // *NDT&E International* 41. – 2008. – P. 169–177.