РАДІОЕЛЕКТРОННІ КОЛА, ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 620.179.14+621.317.42

В. О. Нічога, В. Г. Сторож, А. Д. Педан, Ю. М. Матієшин
Національний університет "Львівська політехніка"

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НОВИХ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ МАГНІТОДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

© Нічога В. О., Сторож В. Г., Педан А. Д., Матієшин Ю. М., 2018

Наведено параметри нових високоефективних сенсорів для магнітодинамічного методу діагностики залізничних рейок. Вони призначені для застосування у сучасних багатоканальних і компонентних методах опрацювання та аналізу діагностичних сигналів у цифровому поданні. В результаті застосування цих сенсорів істотно покращаться виявлення, ідентифікація і класифікація дефектів рейок.

Висвітлено також питання конструкції й електричних параметрів нових малогабаритних індукційних сенсорів на основі аморфних феромагнітних сплавів.

Ключові слова: сенсор Холла, індукційний сенсор, магнітодинамічний метод діагностики рейок.

V. Nichoha, V. Storozh, A. Pedan, Y. Matiieshyn
Lviv Polytechnic National University

STUDY OF PARAMETERS OF NEW HIGH-EFFICIENT SENSORS FOR THE MAGNETIC FLUX LEAKAGE METHOD OF RAILWAY RAILS DIAGNOSTICS

© Nichoha V., Storozh V., Pedan A., Matiieshyn Y., 2018

To create new ways of railway rails diagnostics it is necessary to research and apply modern methods of diagnostic signals processing and analysis in digital representation. This will significantly improve detection, identification and classification of rail defects. To improve the efficiency of magnetic defectoscopy of rails and primarily the magnetic flux leakage method, it is advisable to use multicomponent and multichannel registration of magnetic field disturbances from defects using point converters of input signal.

The paper presents parameters of new highly efficient sensors for the magnetic flux leakage method of rails diagnostics. These sensors are intended for use in modern multichannel and component methods for diagnostic signals processing and their analysis in a digital representation. As a result of these sensors application, detection, identification and classification of defects in rails will be significantly improved.

The questions of design and electrical parameters of new small-sized induction sensors based on amorphous ferromagnetic alloys are also highlighted. Comparison of their electrical parameters with the characteristics of integral type induction sensors, which are now practically used for defectoscopy in the carriages-defectoscopes, is shown.

The parameters of the Hall sensors are given in the paper separately. With the help of an experimental stand with four-channel Hall sensors the recording of artificial defects signals were done. The general comparative table shows the characteristics of small-sized sensors that can be recommended for use in mobile systems of rail defectoscopy.

A multichannel sensor for one scan allows to set not only the approximate dimensions of the defect, but also to determine from which side of the sample it is located.

Key words: Hall sensor, induction sensor, the magnetic flux leakage method of rails diagnostics.

Вступ

Для створення нових способів діагностики стану залізничних рейок необхідні дослідження із застосуванням сучасних методів опрацювання діагностичних сигналів та їх аналізу в цифровому поданні. Це суттєво покращить виявлення, ідентифікацію і класифікацію дефектів рейок.

Для підвищення ефективності магнітної дефектоскопії залізничних рейок і, передусім, магнітодинамічного методу (МДМ) діагностики, доцільно застосовувати багатокомпонентну і багатоканальну реєстрацію збурень магнітного поля дефектами за допомогою точкових перетворювачів вхідного сигналу на основі індукційних сенсорів [1], сенсорів Холла (СХ) або магніторезистивних сенсорів. У зв'язку з цим нагальним завданням є розроблення нових спеціальних компонентних точкових сенсорів і створення, відповідно, нової інформаційно-діагностичної системи (ІДС).

Огляд та аналіз публікацій

У наших роботах [2, 3, 5] розглянуто різні варіанти точкових рамкових індукційних сенсорів, індукційних феромагнітних сенсорів на основі мініатюрних феритових осердь, а також модернізованих інтегральних індукційних однокомпонентних сенсорів. Крім цього, розроблено і практично перевірено на вагоні-дефектоскопі двокомпонентні інтегральні індукційні сенсори [5].

Щодо сенсорів Холла, то вони бувають аналоговими та цифровими [6, 7]. Аналогові сенсори перетворюють індукцію магнітного поля на напругу, знак і величина якої залежать від полярності поля та її величини. Серед цифрових СХ виділяють уніполярні (спрацьовують тільки за наявності магнітного поля відповідної полярності) та біполярні (реагують на зміну полярності магнітного поля). Такі сенсори використовують у багатьох сферах та галузях промисловості: 1) автомобілебудування (для електронного запалювання у двигунах внутрішнього згорання); 2) комп'ютерна техніка (у приводах дисководів та двигунах вентиляторів); 3) залізнична техніка (дефектоскопія залізничних рейок); 4) телекомунікаційна техніка (у магнітометрах смартфонів); 5) електровимірювальна техніка (для безконтактного вимірювання сили струму в провідниках); 6) ракетобудування (на основі ефекту Холла працюють деякі види іонних реактивних двигунів); 7) зчитування магнітних кодів; 8) вимірювання рівня рідини (магнітний поплавок) тощо.

Постановка завдання та його зв'язок з важливими науковими завданнями

Підвищити ефективність та інформативність засобів магнітодинамічної діагностики залізничних рейок можливо, побудувавши інформаційно-діагностичні системи на основі багатоканальних та багатокомпонентних сенсорів. Це потребує створення нових малогабаритних індукційних сенсорів, визначення їх параметрів та порівняння із параметрами відомих сенсорів. Доцільно розглянути можливість застосування сенсорів інших типів, зокрема сенсорів Холла, в багатоканальних сенсорах для дефектоскопії залізничних рейок та опрацювання отриманих інформаційних сигналів.

Феромагнітний індукційний сенсор типу АМ-1

Згідно з поставленим завданням виготовлено макет феромагнітного індукційного сенсора типу АМ-1 з осердям на основі аморфних магнітом'яких сплавів типу ММ-5 Со. Конструктивні особливості сенсора АМ-1 відображено на рис. 1.

Під час проектування цього сенсора передбачали можливість його застосування у багатоканальній і компонентній ІДС, тому ставили умову забезпечення малогабаритності сенсора. Враховуючи це, вказаний матеріал осердя сенсора вибрано з високим значенням відносної магнітної проникності матеріалу, обмотку сенсора виконано безкаркасною і одношаровою, що, в кінцевому випадку, дає змогу розташувати на ширині головки рейки в один ряд як мінімум вісім сенсорів.

Випробування ефективності роботи сенсора АМ-1 і порівняння його з використовуваним раніше інтегральним індукційним сенсором типу МД здійснено на лабораторній установці [4] на

імітаторі рейки з штучно створеним дефектом типу “поперечна тріщина”. Сенсори сканували поздовжню поверхню імітатора рейки з швидкістю приблизно 1 км/год. Результати вимірювань фіксували цифровим двоканальним осцилографом RONDE&SCWARZ HMO 1002 Series, що відображено на рис. 2.

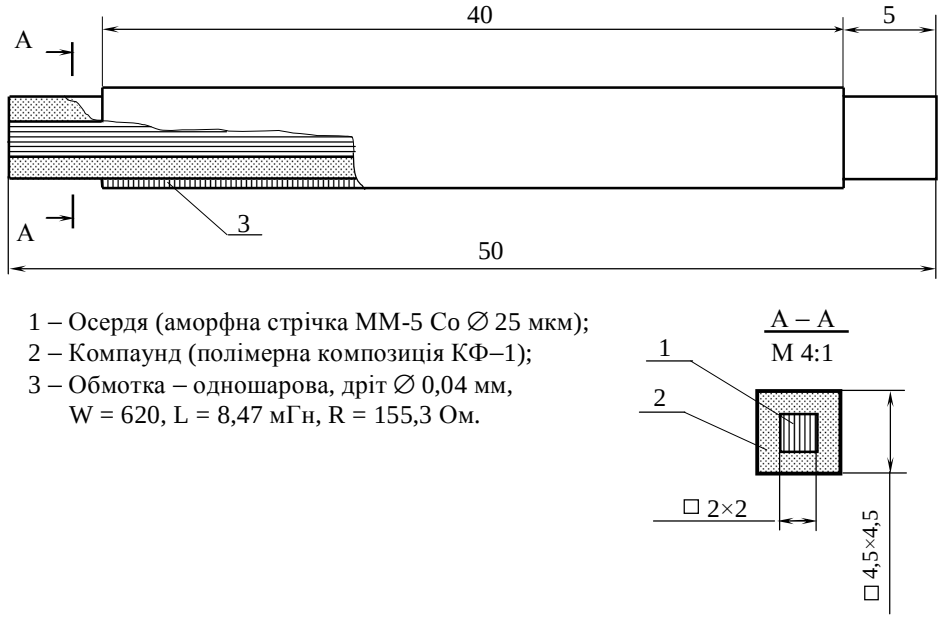
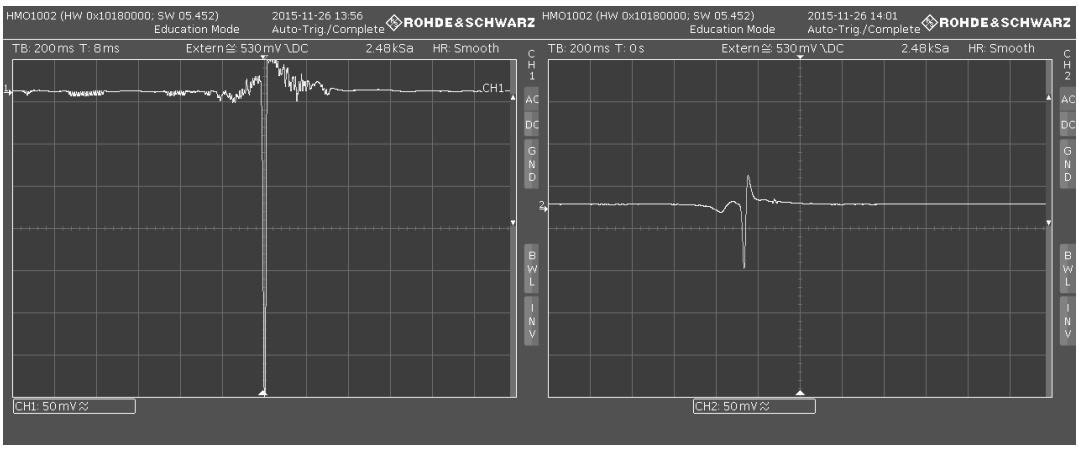


Рис. 1. Феромагнітний індукційний сенсор типу АМ-1



а *б*

Рис. 2. Осцилограми сигналів від “поперечної тріщини” на імітаторі рейки від сенсора АМ-1 (а) та інтегрального індукційного сенсора типу МД (б)

Амплітуда сигналу від тієї самої поперечної тріщини на імітаторі рейки від сенсора типу АМ-1 в 3,5 разу більша від сигналу з інтегрального індукційного сенсора типу МД [2, 3]. Одночасно проводили порівняльні вимірювання з сенсором типу СХ на ефекті Холла [1–3].

Чотириканальний сенсор Холла

Чотириканальний сенсор складався з чотирьох окремих сенсорів Холла SS49E, розташованих поряд, на відстані 1 см один від одного, і налаштованих на реєстрацію повздовжньої складової магнітного поля розсіяння дефекту H_y. За допомогою експериментального стенда [4] здійснено запис сигналів штучних дефектів чотириканальним сенсором. Висота сенсорів над імітатором рейки (ІР) не перевищувала 5 мм. ІР мав форму паралелепіпеда завдовжки 44 см з поперечним перерізом приблизно 5×5 см і був встановлений між постійним магнітами. Фрагмент ІР зі штучними дефектами наведено на рис. 3. Під час дослідження чотири сенсори Холла переміщували вздовж ІР зі штучними дефектами, у результаті чого на їх виходах формувалися інформаційні сигнали.

Перший дефект (див. рис. 3) – це отвір діаметром 3 мм і глибиною 30 мм, просвердлений у боковій стінці зразка на глибині приблизно 1 мм від досліджуваної поверхні. В кінці отвору дефект має вихід на поверхню ІР. Другий дефект – щілина, виконана дисковою фрезою завтовшки 1 мм. Глибина дефекту приблизно 1 см, а кут нахилу 30º. Третій дефект – вертикальний отвір, діаметр якого 3 мм і глибина 8 мм. Окрім вхідного отвору першого дефекту, на боковій стінці ІР є четвертий дефект. Четвертий дефект – це також штучний дефект у вигляді косої вертикальної щілини, виконаний дисковою фрезою аналогічно до другого дефекту.

На рис. 3 прямими пунктирними лініями показано траєкторії переміщення окремих сенсорів Холла над зразком, а стрілками – напрямок їх переміщення, а також відстані між дефектами у міліметрах.

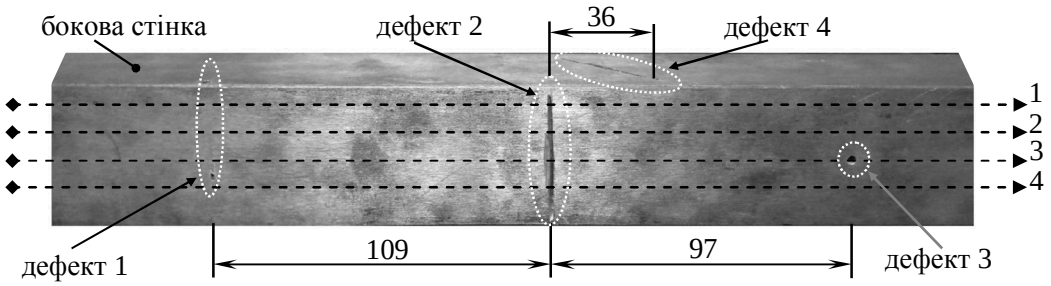


Рис. 3. Фрагмент досліджуваного зразка зі штучними дефектами

Інформаційні сигнали одержували, переміщуючи сенсори вздовж намагніченого зразка імітатора рейки. За допомогою 20-бітного АЦП ці сигнали записали на ПК для їх подальшого оброблення. Результати запису сигналу чотирма сенсорами Холла подано на рис. 4. На графіку ціна однієї поділки по осі амплітуд становить 1000000 відліків АЦП (samples), а по осі відстаней – 40 мм. Для зручності візуального аналізу сигнали каналів (чотирьох сенсорів) зміщені один відносно одного по осі амплітуд.

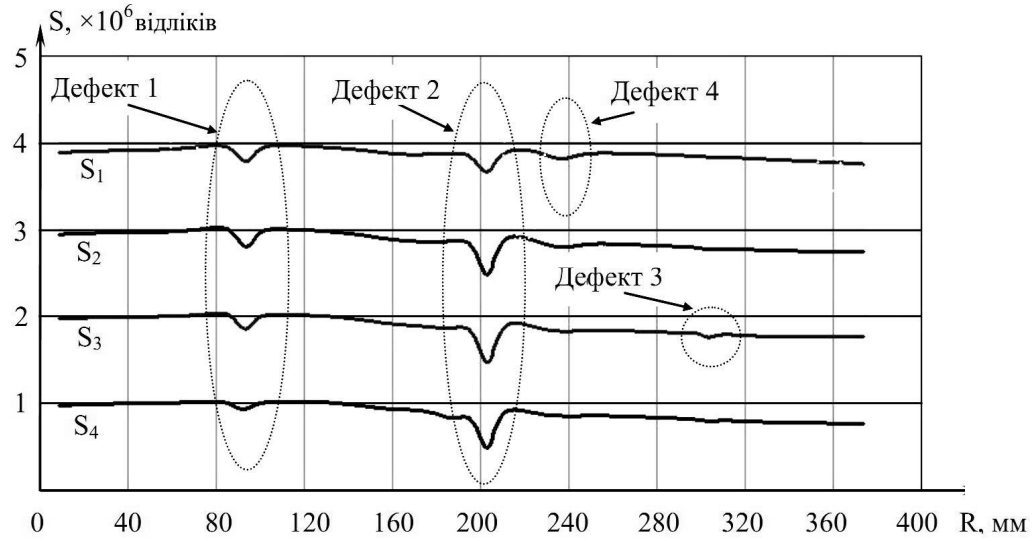


Рис. 4. Результати запису інформаційного сигналу

Як видно з результатів експерименту, застосування чотирьох сенсорів і чотирьох каналів реєстрації сигналів дефектів дає змогу точніше локалізувати дефекти на досліджуваному об'єкті. Наприклад, перший дефект зафіксували усі сенсори. Однак амплітуда четвертого каналу (S4) менша, ніж трьох перших, оскільки траєкторія четвертого сенсора Холла проходить за межами цього дефекту.

Сигнал від другого дефекту також зафіксовано усіма сенсорами. Однак його амплітуда у першому каналі (S1) менша, ніж у інших, що вказує на завершення меж цього дефекту (рис. 3). Окрім того, в першому каналі (S1) поряд з цим сигналом від другого дефекту є сигнал з малою

амплітудою від четвертого дефекту, який виконано у боковій стінці зразка (рис. 3), що підтверджує потенційну можливість локалізувати дефекти на бокових гранях досліджуваних зразків.

Візуально сигнал від третього дефекту зафіксовано тільки третім сенсором S3 (див. рис. 4). Це пояснюється малими поперечними розмірами цього дефекту у вигляді вертикального отвору діаметром 3 мм. Тому, в масштабі цього графіка, сигнали від третього дефекту, які зафіксували інші сенсори, не могли бути відображені. Однак детальний аналіз показав, що за відповідного підсилення сигнали від третього дефекту, які зафіксували другий (S2) та четвертий (S4) сенсори, мають достатню амплітуду. Для прикладу розглянемо окремо сигнал від третього штучного дефекту, записаний чотириканальним сенсором (рис. 5). По осі відстаней виділено фрагмент від 280-го до 320-го міліметра досліджуваного зразка. На цьому графіку ціна однієї поділки по осі амплітуд становить 10000 відліків АЦП, що еквівалентно підсиленню в 50 разів щодо даних попереднього графіка (рис. 4).

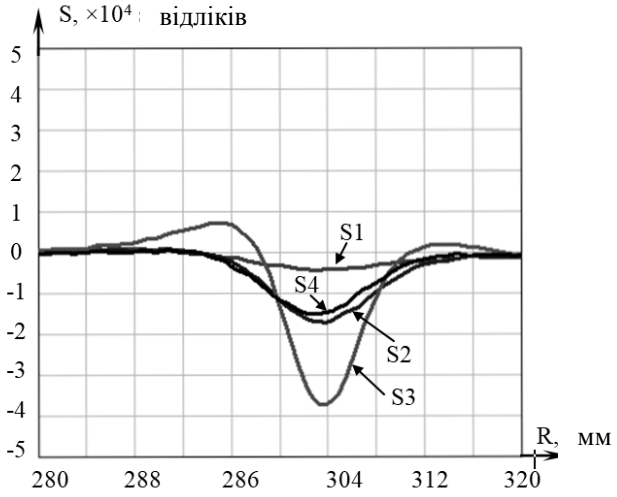


Рис. 5. Сигнал від третього штучного дефекту, записаний чотириканальним сенсором

Як видно з графіка (рис. 5), найбільшою є амплітуда сигналу, отримана в третьому каналі (S3), сенсор якого проходив безпосередньо над третім дефектом. Другий і четвертий сенсори переміщалися зліва і справа від третього сенсора на відстані один сантиметр. Амплітуди цих сигналів (S2 і S4) співмірні, приблизно у 2,5 разу менші за амплітуду сигналу третього сенсора.

Сигнал першого сенсора S1, який переміщався на відстані 2 см збоку від третього дефекту, також можна виділити, проте його амплітуда у дев'ять разів менша від амплітуди сигналу S3. Водночас першим сенсором S1 було зафіксовано сигнал від четвертого штучного дефекту, розміщеного на боковій грані досліджуваного зразка. Тому, за відповідного підсилення і оброблення сигналів, можливо достатньо точно визначати розміри дефектів та місця їхнього розташування у поперечному перерізі об'єкта. Зокрема, під час рейкової дефектоскопії це дасть змогу не тільки виявляти дефекти, але й спостерігати за їх розвитком (розростанням) з фіксацією змін меж цих дефектів, що підвищить інформативність дефектоскопічної системи.

Порівняння основних параметрів досліджуваних сенсорів для діагностики рейок

Основні електричні параметри досліджуваних сенсорів, окрім сенсорів Холла, для діагностики рейок, які ми розробили, подано в табл. 1, де:

$S_ф$ – фізична площа поперечного перерізу сенсора, м^2;

$S_д = S_ф \cdot w$ – еквівалентна площа сенсора, м^2;

$M = \mu_0 \cdot \mu_т \cdot S_ф \cdot w$ – магнітний момент сенсора, Гн·м (на частоті 1 кГц);

$G_{1\,кГц} = \omega \cdot M$ – чутливість сенсора, В/(А/м) (на частоті 1 кГц);

f_0 – власна резонансна частота сенсора, кГц;

w – кількість витків котушки сенсора;

$d_{пр}$ – діаметр проводу котушки сенсора, мм;
L_0 – індуктивність котушки сенсора, мГн;
r_0 – опір втрат, Ом;
$\omega = 2\pi f$ – кругова частота, 1/с.

Таблиця 1

Електричні параметри досліджуваних сенсорів для діагностики рейок

Параметр	$S_ф$, $м^2$	$S_д$, $м^2$	M, Гн·м	$G_{1\ кГц}$, В/(А/м)	f_0, кГц	w	$d_{пр}$, мм	L_0, мГн	r_0, Ом
Сенсор типу МД	$4{,}5\cdot10^{-4}$	0,115	$0{,}14\cdot10^{-6}$	0,0009	186	250	0,13	2,52	41
Точковий сенсор типу ТРД	$0{,}5\cdot10^{-4}$	0,055	$1{,}75\cdot10^{-6}$	0,0011	150	1100	0,063	16	160
Локальний сенсор типу ФІД-6	$1{,}5\cdot10^{-4}$	0,084	$3{,}7\cdot10^{-6}$	0,0023	100	560	0,25	14	8,5
Сенсор типу АМ-1	0,04	0,0025	$5{,}2\cdot10^{-6}$	0,0032	160	620	0,04	8,47	155

У табл. 2 наведено порівняльні дані щодо чутливості різних типів малогабаритних сенсорів на частоті 1 кГц.

Таблиця 2

Порівняльні дані щодо чутливості різних типів сенсорів

Тип сенсора	МД	ТРД	ФІД-6	LEMI-139	АМ-1	СХ
Чутлив. G В/(А/м) на f=1кГц	$9\cdot10^{-4}$	$11\cdot10^{-4}$	$23\cdot10^{-4}$	$62{,}8\cdot10^{-4}$	$32\cdot10^{-4}$ Розрах. значен. для $\mu_т$ = 1630	$0{,}175\ 10^{-4}$
Розміри сенсора, мм	Розміри каркаса 85×15×15 [мм]	Розміри каркаса l = 7 мм, d = 6 мм	Фер. осердя 3×7×34 [мм]	Осердя l=19 мм, d=3,5 мм, D_0=10 мм (концент.)	Осердя 2×2×50 [мм] Шихтоване з стрічки	Пластина 2,9×2,8×1,4 [мм]
Тип осердя	Без осердя (рамковий)	Без осердя (рамковий)	Феритове осердя	Аморфний сплав	Аморфний сплав	Гальваномагнітний давач
Примітка	Інтегральний сенсор	Точковий сенсор	Локальний сенсор	Локальний сенсор	Локальний сенсор	Точковий сенсор

У табл. 2 для порівняння наведено параметри малогабаритного сенсора LEMI-139 наносупутника типу “кубсат” для космічних досліджень [2, 3], а також сенсора Холла (СХ) [3].

Висновки

Порівняльний аналіз досліджуваних сенсорів дав змогу встановити, що інтегральний індукційний сенсор типу МД за результатами вимірювань у кільцях Гельмгольца [2, 3] має чутливість $G_{1\ кГц}=9\cdot10^{-4}$ В/(А/м), або $7{,}2\cdot10^{-4}$ мВ/нТл. Цей сенсор реально перевірено на вагоні-дефектоскопі, його чутливість достатня для реалізації дефектоскопії залізничних рейок. Оскільки чутливість на частоті 1 кГц сенсорів Холла становить $0{,}175\ 10^{-4}$ В/(А/м) ($0{,}14\cdot10^{-4}$ мВ/нТл), що приблизно у 50 разів менше, то довелося для реалізації багатоканального давача на основі сенсорів Холла використовувати попередні підсилювачі. Багатоканальний давач за одне сканування дає змогу встановити не тільки орієнтовні розміри дефекту, але й визначити, з якого боку досліджуваного зразка він міститься. Під час дефектоскопії залізничних рейок ця додаткова інформація дає змогу визначити, з якого боку головки рейки розташований дефект – із робочого чи неробочого. В сукупності з інформацією про його орієнтовні розміри це забезпечить встановлення ступеня небезпеки виявленого дефекту.

Показано, що перспективним, з погляду чутливості, є феромагнітний індукційний сенсор АМ-1. Його чутливість у 3,5 разу вища, ніж чутливість інтегрального індукційного сенсора МД. Оскільки цей сенсор також індукційного типу, то форма сигналу на його виході звична для операторів вагона дефектоскопа. Проте можливість застосування його для реалізації багатоканальних давачів потребує додаткових досліджень.

1. Нічога В. О. Компонентні давачі для магнітної діагностики технічного стану рейок залізничної колії / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, І. В. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – № 3. – С. 34–43. 2. Нічога В. Малогабаритні індукційні давачі для діагностики середовищ і об'єктів / В. Нічога, В. Проненко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" - Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2012. – № 738. – С. 65–74. 3. Нічога В. О. Параметри індукційних сенсорів для діагностики об'єктів, середовищ і систем / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, Л. В. Ващишин // Відбір і обробка інформації. - 2015. - Вип. 42 (118). - С. 27–34. 4. Saldan O. Experimental research of signals of defects such as the transverse cracks on the rail imitator / O. Saldan, V. Nichoha, V. Storozh, I. Storozh, I. Stefanyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016: XIII Int. Conf., 23–26 February 2016: Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2016. – P. 222–225. 5. Нічога В. О. Магнітодинамічний метод діагностики залізничної колії і напрямки його модернізації / В. О. Нічога, І. Н. Прудиус, І. В. Сторож, В. Г. Сторож, Л. В. Ващишин, П. Б. Дуб // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" - Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2016. – № 849. – С. 99–116. 6. Ramsden Edward. Hall-Effect Sensors: Theory and Applications, 2nd edition / Edward Ramsden. – Amsterdam; Boston: Elsevier/Newnes, 2006. - 250 p. 7. SS39ET/ SS49E/ SS59ET Series Linear Hall-Effect Sensor ICs: Electronic resource, [access: 5 May 2018], available on https://sensing. honeywell. com/sensors/magnetic-sensor-ICs.

References

1. Nichoga V. O. Component sensors for magnetic diagnostics of railroad track rails technical condition / V. O. Nichoga, P. B. Dub, I. V. Storozh // Information and control systems on the railway transport. – 2014. – № 3. – P. 34–43. 2. Nichoga V. Small-sized induction sensors for the diagnostics of environments and objects / V. Nichoga, V. Pronenko // Bulletin of Lviv Polytechnic National University – Radioelectronics and Telecommunications. – 2012. – № 738. – P. 65–74. 3. Nichoha V. O. Parameters of induction sensors for diagnostics of objects, media and systems / V. O. Nichoha, P. B. Dub, L. V. Vashchyshyn // Information Extraction and Process. - 2015. - Issue 42 (118). - P. 27–34. 4. Saldan O. Experimental research of signals of defects such as the transverse cracks on the rail imitator / O. Saldan, V. Nichoha, V. Storozh, I. Storozh, I. Stefanyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016: XIII Int. Conf., 23–26 February 2016: Proceedings. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2016. – P. 222–225. 5. Nichoha V. O. The magnetic flux leakage method of railway track diagnostics and ways of it modernization / V. O. Nichoha, I. N. Prudyus, I. V. Storozh, V. G. Storozh, L. V. Vashchyshyn, P. B. Dub // Bulletin of Lviv Polytechnic National University – Radioelectronics and Telecommunications. – 2016. – № 849. – P. 99–116. 6. Ramsden Edward. Hall-Effect Sensors: Theory and Applications, 2nd edition / Edward Ramsden. – Amsterdam; Boston: Elsevier/Newnes, 2006. - 250 p. 7. SS39ET/SS49E/SS59ET Series Linear Hall-Effect Sensor ICs: Electronic resource, [access: 5 May 2018], available on https://sensing. honeywell. com/sensors/magnetic-sensor-ICs.