

РАДИОЕЛЕКТРОННІ 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., 2020

У роботі наведено параметри нових вискоефективних 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. Використання цих сенсорів істотно покращить виявлення, ідентифікацію і класифікацію дефектів рейок.

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

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

V. O. Nichoha, V. G. Storozh, A. D. Pedan, Y. M. 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. O., Storozh V. G., Pedan A. D., Matiieshyn Y. M., 2020

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-defectoscopy, 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 і застосування сучасних методів опрацювання діагностичних сигналів та їх аналізу в цифровому поданні. Це істотно покращить виявлення, ідентифікацію і класифікацію дефектів рейок.

Для підвищення ефективності магнітної дефектоскопії залізничних рейок і, передусім, магнітодинамічного методу (МДМ) діагностики, доцільно застосувати 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 роботах [2, 3, 5] ми розглянули різні варіанти точкових рамкових індукційних сенсорів, індукційних феромагнітних сенсорів на основі мініатюрних феритових осердь, а також модернізованих інтегральних індукційних однокомпонентних сенсорів. Крім цього, розроблено та практично перевірено на вагоні-дефектоскопі двокомпонентні інтегральні індукційні сенсори [5].

Сенсори Холла бувають аналоговими та цифровими [6, 7]. Аналогові сенсори перетворюють індукцію магнітного поля на напругу, знак і значення 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) автомобілебудуванні (для електронного запалювання у двигунах внутрішнього згорання); 2) комп'ютерній техніці (у приводах дисководів та двигунах вентиляторів); 3) залізничній техніці (дефектоскопії залізничних рейок); 4) телекомунікаційній техніці (у магнітометрах смартфонів); 5) електровимірювальній техніці (для безконтактного вимірювання сили струму в провідниках); 6) ракетобудуванні (на основі ефекту Холла працюють деякі види іонних реактивних двигунів); 7) зчитуванні магнітних кодів; 8) вимірюванні рівня рідини (магнітний поплавок) тощо.

Постановка завдання та її 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 із 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 передбачено можливість його застосування у багатоканальній і компонентній ІДС. Тому поставлено умову забезпечення малогабаритності сенсора. Враховуючи це, вказаний матеріал осердя сенсора вибрано із високим значенням відносної магнітної проникності матеріалу, обмотку сенсора виконано безкаркасною і одношаровою, що, в кінцевому варіанті, 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] – імітаторі рейки зі штучно створеним дефектом типу “поперечна тріщина”. Сенсори сканували поздовжню поверхню імітатора рейки зі швидкістю приблизно 1 км/год. Результати вимірювань фіксували цифровим двоканальним осцилографом RONDE&SCWARZ HMO 1002 Series. Їх відображено на рис. 2.

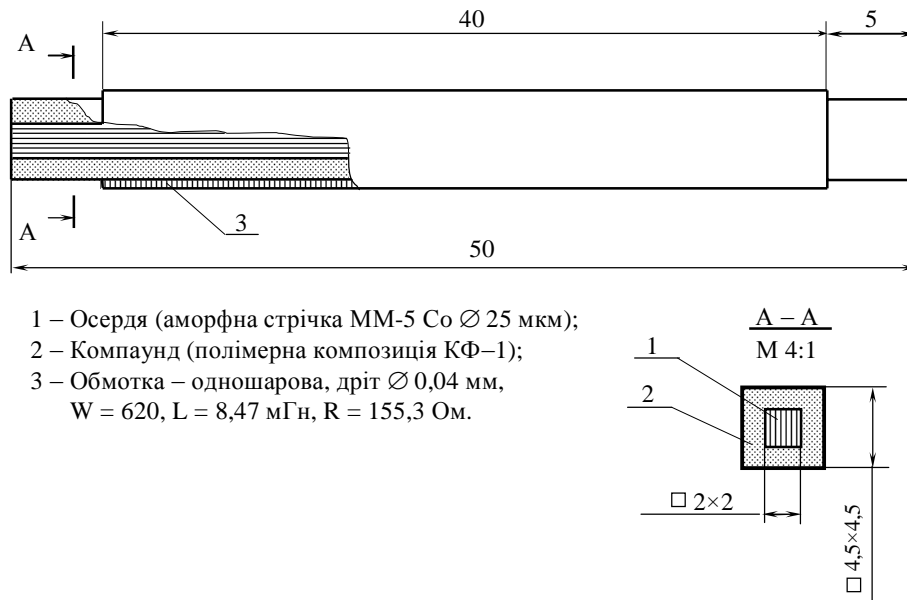
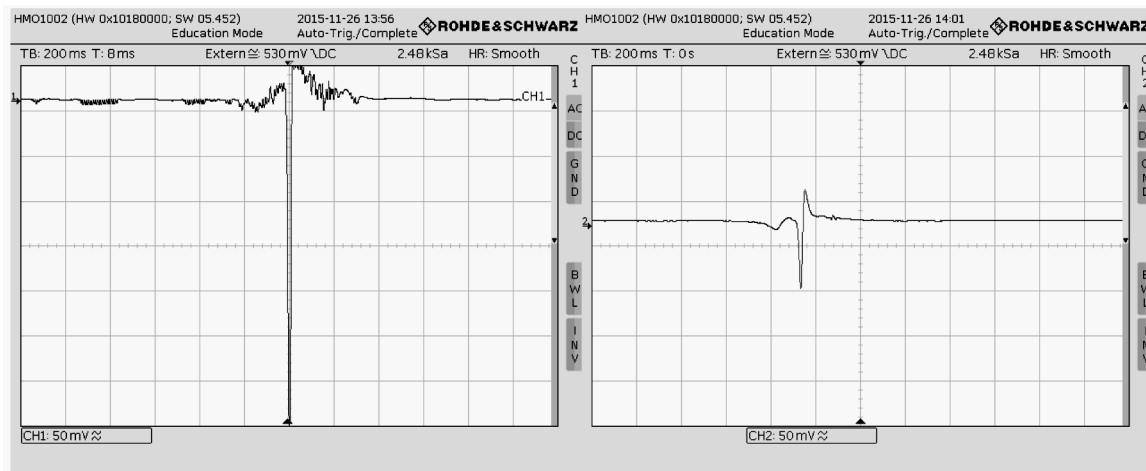


Рис. 1. Феромагнітний індукційний сенсор типу АМ-1



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 із інтегрального індукційного сенсора типу МД [2, 3]. Одночасно проводили порівняльні вимірювання із сенсором типу СХ на ефекті Холла [1–3].

Чотириканальний сенсор Холла

Чотириканальний сенсор складався із чотирьох окремих сенсорів Холла SS49Е, розташованих поряд, на відстані 1 см один від одного, і налаштованих на реєстрацію повздовжньої складової магнітного поля розсіяння дефекту H_z . 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 із поперечним перерізом приблизно 5×5 см і був встановлений між постійними магнітами. Фрагмент ІР зі штучними дефектами наведено на рис. 3. Під час дослідження чотири сенсори Холла переміщувались вздовж ІР зі штучними дефектами, у результаті чого на їхніх 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 30°. Третій дефект – вертикальний отвір діаметром 3 мм і глибиною 8 мм. Окрім вхідного отвору першого дефекту, на боковій стінці ІР наявний четвертий дефект – 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, стрілками – напрямом їх переміщення, а також відстані між дефектами у міліметрах.

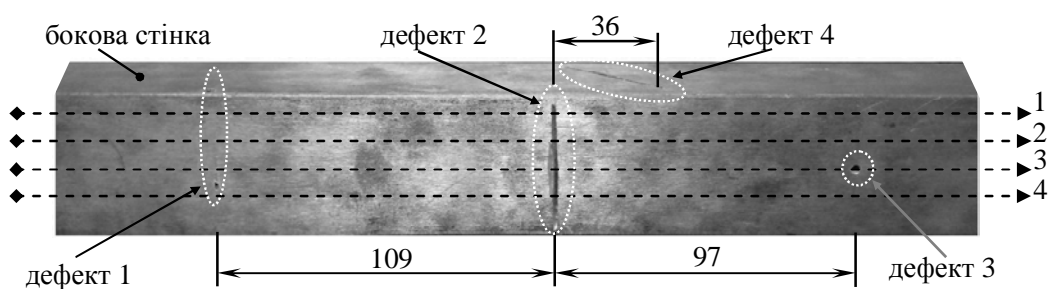


Рис. 3. Фрагмент досліджуваного зразка зі штучними дефектами

Інформаційні сигнали отримано у результаті переміщення сенсорів вздовж намагніченого зразка імітатора рейки. За допомогою 20-бітного АЦП ці сигнали записано на ПК для їх подальшого опрацювання. 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.

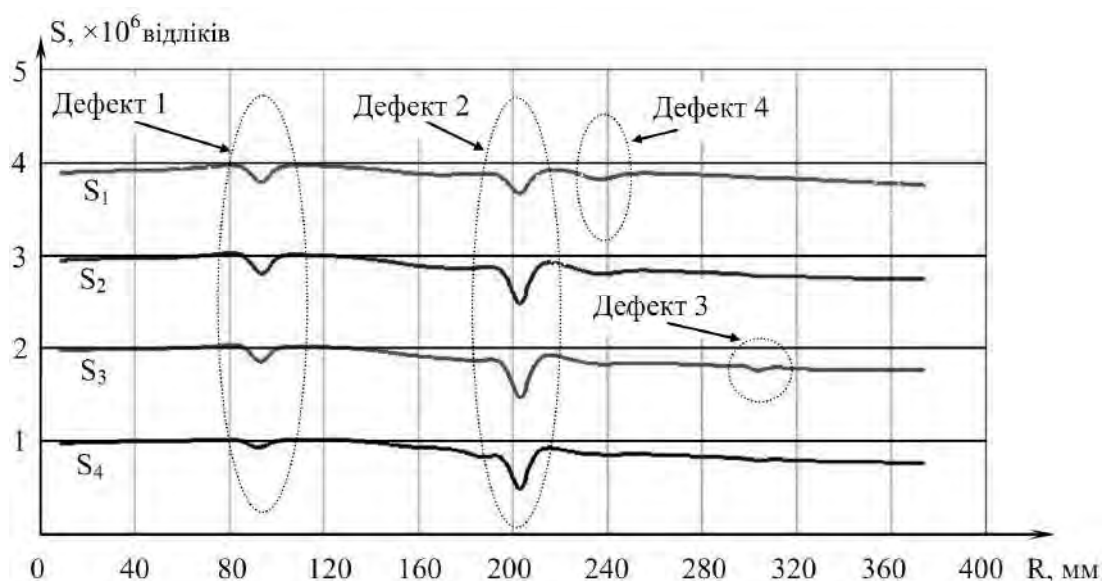


Рис. 4. Результати запису інформаційного сигналу

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 поза межами цього дефекту.

Сигнал від другого дефекту також зафіксували усі сенсори. Однак його амплітуда у першому каналі (S1) менша, ніж у інших, що вказує на завершення меж цього дефекту (див. рис. 3). Окрім того, в першому каналі (S1) поряд із цим сигналом від другого дефекту спостерігається сигнал із малою амплітудою від четвертого дефекту, який виконано у боковій стінці зразка (див. рис. 3), що підтверджує потенційну можливість локалізувати дефекти на бокових гранях досліджуваних зразків.

Візуально сигнал від третього дефекту зафіксував тільки третій сенсор 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). На 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).

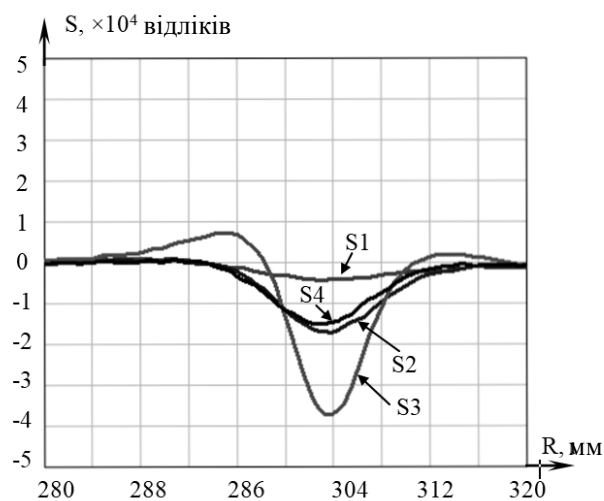


Рис. 5. Сигнал від третього штучного дефекту, записаний чотириканальним сенсором

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 й приблизно у 2,5 разу менші за амплітуду сигналу третього сенсора.

Сигнал першого сенсора S1, який переміщувався на відстані 2 см збоку від третього дефекту, також можна виділити, проте його амплітуда у дев'ять разів менша від амплітуди сигналу S3. Водночас перший сенсор S1 зафіксував сигнал від четвертого штучного дефекту, розташованого на боковій грані досліджуваного зразка. Тому в разі відповідного підсилення і оброблення сигналів можна достатньо точно визначати розміри дефектів та місця їхнього розташування у поперечному перерізі об'єкта. Зокрема, під час проведення рейкової дефектоскопії це дасть змогу не тільки

виявляти дефекти, але й спостерігати за їх розвитком (розростанням) із фіксацією змін їхніх меж, що підвищить інформативність дефектоскопічної системи.

Порівняння основних параметрів досліджуваних сенсорів для діагностики рейок

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

- S_{ϕ} – фізична площа поперечного перерізу сенсора, м²;
- $S_o = S_{\phi} \cdot w$ – еквівалентна площа сенсора, м²;
- $M = \mu_o \cdot \mu_m \cdot S_{\phi} \cdot w$ – магнітний момент сенсора, Гн·м (на частоті 1 кГц);
- $G_{1 \text{ кГц}} = \omega \cdot M$ – чутливість сенсора, В/(А/м) (на частоті 1 кГц);
- f_0 – власна резонансна частота сенсора, кГц;
- w – кількість витків котушки сенсора;
- d_{np} – 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_{ϕ} , м ²	S_o , м ²	M , Гн·м	$G_{1 \text{ кГц}}$, В/(А/м)	f_0 , кГц	w	d_{np} , мм	L_0 , мГн	r_0 , Ом
Сенсор типу МД	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,115	$0,14 \cdot 10^{-6}$	0,0009	186	250	0,13	2,52	41
Точковий сенсор типу ТРД	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,055	$1,75 \cdot 10^{-6}$	0,0011	150	1100	0,063	16	160
Локальний сенсор типу ФІД-6	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,084	$3,7 \cdot 10^{-6}$	0,0023	100	560	0,25	14	8,5
Сенсор типу АМ-1	0,04	0,0025	$5,2 \cdot 10^{-6}$	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	ЛЕМІ-139	АМ-1	СХ
Чутл. G В/(А/м) на $f=1 \text{ кГц}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$23 \cdot 10^{-4}$	$62,8 \cdot 10^{-4}$	$32 \cdot 10^{-4}$ Розрах. знач. для $\mu_m=1630$	$0,175 \cdot 10^{-4}$
Розміри сенсора, мм	Розміри каркаса, $85 \times 15 \times 15$ мм	Розміри каркаса $l=7$ мм, $d=6$ мм	Фер. осердя, $3 \times 7 \times 34$ мм	Осердя $l=19$ мм, $d=3,5$ мм, $D_0=10$ мм (концент.)	Осердя, шихтоване зв стрічки $2 \times 2 \times 50$ мм	Пластина $2,9 \times 2,8 \times 1,4$ 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 ЛЕМІ-139 наносупутника типу “кубсат” для космічних досліджень [2, 3], а також сенсора Холла (СХ) [3].

Висновки

Порівняльний аналіз досліджуваних сенсорів дав підстави зробити певні висновки. Чутливість інтегрального індукційного сенсора типу МД за результатами вимірювань у кільцях Гельмгольца [2, 3] становить $G_{1\text{кГц}}=9\cdot 10^{-4}\text{ В/(А/м)}$, або $7,2\cdot 10^{-4}\text{ мВ/нТл}$. Цей сенсор реально перевірено на вагоні-дефектоскопі, його чутливість достатня для виконання дефектоскопії залізничних рейок. Оскільки чутливість на частоті 1 кГц сенсорів Холла становить $0,175\cdot 10^{-4}\text{ В/(А/м)}$ ($0,14\cdot 10^{-4}\text{ мВ/нТл}$), що приблизно у 50 разів менше, то необхідно для реалізації багато-канального давача на основі сенсорів Холла використовувати попередні підсилювачі. Багато-канальний давач дає змогу за одне сканування не тільки встановити орієнтовні розміри дефекту, але й визначити, з якого боку досліджуваного зразка він розміщений. Під час дефектоскопії залізничних рейок ця додаткова інформація дає можливість визначити, з якого боку головки рейки розташований дефект – з робочого чи неробочого. В сукупності з інформацією про його орієнтовні розміри це дасть змогу встановити ступінь 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 є звичною для операторів вагона-дефектоскопа. Проте можливість застосування його для реалізації багато-канальних давачів потребує додаткових досліджень.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Нічога В., Проненко В. Малогабаритні індукційні давачі для діагностики середовищ і об'єктів. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Радіоелектроніка та телекомунікації, 2012, № 738, С. 65–74.
3. Нічога В. О., Дуб П. Б., Ващишин Л. В. Параметри індукційних сенсорів для діагностики об'єктів, середовищ і систем. Відбір і обробка інформації, 2015, Вип. 42 (118), С. 27–34.
4. 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. Магнітодинамічний метод діагностики залізничної колії і напрямки його модернізації / В. О. Нічога, І. Н. Прудіус, 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. 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., Dub P. B., Storozh I. V. Component sensors for magnetic diagnostics of railroad track rails technical condition, Information and control systems on the railway transport, 2014, No. 3, P. 34–43.
2. Nichoga V., Pronenko V. Small-sized induction sensors for the diagnostics of environments and objects. Bulletin of Lviv Polytechnic National University – Radioelectronics and Telecommunications, 2012, No. 738, P. 65–74.
3. Nichoha V. O., Dub P. B., Vashchyshyn L. V. Parameters of induction sensors for diagnostics of objects, media and systems. Information Extraction and Process, 2015, Issue 42 (118), P. 27–34.

4. *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. *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, No. 849, P. 99–116.*

6. *Ramsden Edward. Hall-Effect Sensors: Theory and Applications, 2nd edition. 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>.*