УДК 620.179.143

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО УСУНЕННЯ МАГНІТНИХ ЗАВАД ПРИ ФЕРОЗОНДОВОМУ КОНТРОЛІ ОСЕЙ КОЛІСНИХ ПАР

Шведчикова І.О., Шевченко О.І., Нікітченко І.В.

ANALYSIS OF APPROACHES TO REMOVING OF MAGNETIC INTERFERENCE UNDER FLUXGATE TESTING OF AXES OF WHEEL PAIRS

Shvedchykova I.O., Shevchenko O.I., Nikitchenko I.V.

В статті визначено та проаналізовано основні підходи до зменшення або усунення магнітних завад при ферозондовому контролі дефектів в осях колісних пар. За результатами порівняльного аналізу виділено три основних напрямки усунення магнітних завад: використання схемних рішень, фільтрація сигналів з ферозонду за допомогою цифрових фільтрів та впровадження конструктивних удосконалень блоку ферозондових датчиків. Показано, що найбільш універсальним напрямком зменшення магнітних завад є конструктивні удосконалення ферозондових датчиків, варіанти технічної реалізації яких запропоновані в статті.

Ключеві слова: *вісь колісної пари, дефект, неруйнівний контроль, магнітне поле, завада, ферозонд.*

Вступ. Високі швидкості руху на залізничному транспорті та перспективи їх подальшого зростання висувають підвищені вимоги до безпеки руху потягів. Одним з найбільш відповідальних вузлів рухомого складу є колісна пара, порушення в роботі якої неприпустимі. Будь-який дефект колісної пари, наприклад, злам осі, може привести до непоправних наслідків, які супроводжуються великими економічними втратами, а часто, і людськими жертвами. Враховуючи, що колісна пара є основним вузлом рухомого складу та найбільш схильна до динамічних навантажень, то діагностика стану колісної пари і, в першу чергу осей, є актуальним науково-технічним завданням.

Постановка проблеми. Основною перешкодою для використання ферозондового методу неруйнівного контролю східчастих циліндричних поверхонь, зокрема осей колісних пар, є магнітне поле завади, обумовлене крайовим ефектом і високою кривизною поверхні на сходинках. Попри те, що топографія магнітного поля завади відома, вона не є детермінованою, оскільки відрізняється для різних осей і різних умов намагнічування. У цій роботі ставиться завдання проаналізувати відомі підходи до усунення завади постійного магнітного поля або магнітного поля, що повільно змінюється, при ферозондовому контролі дефектів несуцільності в осях колісних пар.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В процесі експлуатації утворюються, зокрема, такі дефекти осей колісних пар [1, 2]:

тріщини – через невиявлені при виготовленні виробничо-технологічні дефекти;

рифлення – в результаті ураження поверхні катання колеса електричним струмом певної частоти в результаті пробою;

задири і риски на підматочинних частинах осі – через схоплювання металу при розпресуванні коліс з осі або при провороті колеса на осі при порушенні пресового з'єднання колеса з віссю;

корозійні ушкодження на шийках і галтелях осі – через взаємодію з поверхнево активними хімічними речовинами, водою і вологою.

Для своєчасного виявлення і вилучення з експлуатації осей колісних пар з дефектами в процесі виготовлення та ремонту передбачені візуальні обстеження, а також застосування технічних засобів магнітної, ультразвукової або вихорострумової дефектоскопії [1-7]. Так, в [3] описана установка, що призначена для виявлення внутрішніх і поверхневих дефектів при проведенні автоматизованого неруйнівного контролю колісних пар вантажних вагонів ультразвуковим і вихорострумовим методами. Недоліками вказаних методів контролю є великі завади, що виникають із-за конструктивних особливостей осі.

У практиці магнітної дефектоскопії осей колісних пар в період їх виготовлення або ремонту найбільше поширення отримав магнітопорошковий метод, заснований на візуальній реєстрації магнітних полів розсіяння, що виникають над дефектами. Він дозволяє контролювати вироби будь-яких розмірів і форм [4, 5]. В процесі магнітопорошкового

контролю значну роль відіграє людський чинник, що знижує достовірність контролю. Навіть при використанні оптико-електронних засобів спостереження за станом поверхні магнітопорошковий метод є візуальним, тобто роль оператора-дефектоскопіста в процесі контролю зберігається домінуючою.

Для підвищення якості неруйнівного контролю осей колісних пар вагонів в [6] запропоновано поряд з існуючими методами ультразвукового та магнітопорошкового контролю використовувати додатковий контроль за величиною коерцитивної сили з визначенням залишкових і робочих внутрішніх напружень металу.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що існуючі методи неруйнівного контролю осей колісних пар характеризуються суб'єктивністю в оцінці дефектів і складністю автоматизації процесу контролю. Повністю автоматизувати процес контролю дозволяє магнітоферозондовий (ферозондовий) метод. Проте для контролю осей рухомого складу цей метод досі не отримав широкого застосування через поля розсіяння східчастої поверхні осі, яка створює поле завади, що перевищує за величиною поле розсіяння дефектів.

Мета статті. Аналіз відомих підходів до усунення завад магнітного поля при ферозондовому контролі дефектів несуцільності в осях колісних пар.

Результати дослідження. Ферозондовий метод неруйнівного контролю заснований на зчитуванні розподілу параметрів магнітного поля на поверхні намагніченої контрольованої деталі за допомогою ферозондових перетворювачів [7]. Порівняння отриманого розподілу поля з еталонним (характерним для бездефектної деталі) дозволяє прийняти рішення про виявлення (чи не виявлення) дефекту.

У ферозондах реалізується процес взаємодії двох полів: зовнішнього вимірюваного і власного поля збудження. Ферозонд складається з двох осердь, виконаних з магнітом'якого матеріалу (аморфне залізо), і має дві обмотки: збудження і вимірювальну. Обмотка збудження живиться синусоїдальним струмом такої амплітуди, щоб доводити осердя до стану, близького до насичення. Спектр вихідної електрорушійної містить, окрім другої гармоніки, також вищі гармоніки, амплітуди яких пропорційні вимірюваному полю H_0. Найбільш часто використовуються стрижневі ферозонди.

Основним методом усунення завади постійного магнітного поля при ферозондовому контролі дефектів несуцільності є включення напівелементів ферозондів за градієнтометричною схемою. Метод цей є ефективним за рахунок простоти реалізації і можливості глибокого пригнічення завади.

На рис.1 показана вертикальна складова поля завади H_n і різницевої напруженості ΔH_n сигналу і завади на осі з дефектом в галтельному переході. З графіків видно, що навіть включення ферозонду за градієнтометричною схемою не усуває заваду, викликану негладкістю поверхні осі колісних пар. Завада має максимальне значення у сходинці осі, напруженість поля завади перевищує рівень корисного сигналу. Проте швидкість зміни сигналу від подовжньої координати осі різна, тобто є можливість виділення сигналу на тлі завади [8].

Застосування градієнтометричного методу не завжди ефективне, оскільки відстроювання від завади, що має низькочастотний просторовий спектр, шляхом застосування градієнтометричної схеми включення потребує низького порогу чутливості ферозонду і високої його чутливості. При цьому виникає проблема завадостійкості магнітометричного каналу, оскільки величина порогу чутливості ферозонду стає співрозмірною з рівнем електромагнітних завад [9]. Тому іншим варіантом виключення завади, що має низькочастотний спектр, є частотний аналіз вихідного сигналу [10]. Частотна селекція інформаційного сигналу ускладнена, оскільки функції спектральної щільності цих сигналів розташовані близько один від одного і селекція аналоговими технічними сигналами малоефективна. Раціональним методом виділення інформаційного сигналу є фільтрація сигналів за допомогою цифрових фільтрів.

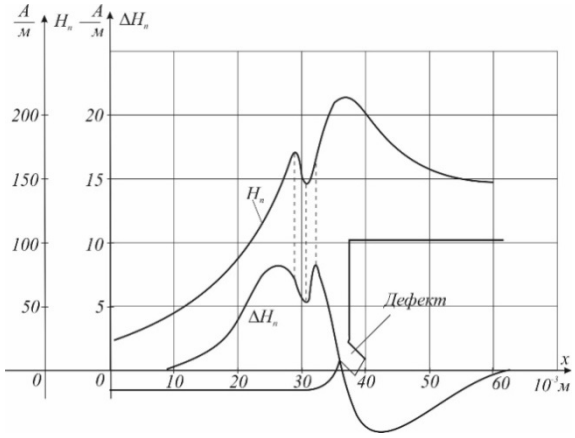

Рис.1. Розподіл вертикальної складової H_n і різницевої напруженості ΔH_n магнітних полів сигналу і завади у сходинці осі

На думку авторів статті найбільш універсальним напрямком зменшення магнітних завад є конструктивні удосконалення ферозондових датчиків. Розглянемо це більш детально на наступних прикладах.

У [11] запропоновано реалізувати компенсацію поля завади за рахунок введення в магнітну систему вимірювального перетворювача дефектоскопа компенсаційного ферозонду. Довжина осердь компенсаційного ферозонду вибирається такою, що він стає практично нечутливим до поля розсіяння дефекту, зберігаючи високу чутливість до поля

завад, джерелом яких є сходинки поверхні контрольованої осі і її краю. Конструкція такого вимірювального перетворювача показана на рис. 2.

Основний і компенсаційний ферозонди вимірюють одну (нормальну до поверхні деталі) складову напруженості магнітного поля. Співвідношення між довжинами осердь вибирається таким, щоб відношення максимального значення магнітного потоку від дефекту в осерді основного ферозонду було в п'ять разів більше максимального значення потоку в осерді компенсаційного ферозонду. Перевагою запропонованої конструкції є те, що при повороті осі вимірювального перетворювача обертаються одночасно основний і компенсаційний ферозонди.

Розроблена в [11] методика розрахунку магнітного потоку, наведеного в осерді ферозонду полем дефекту, дає можливість розрахувати співвідношення довжин осердь основного і компенсаційного ферозондів, при якому забезпечується необхідне пригнічення сигналу від дефекту в компенсаційному ферозонді. Розміщувати основний і компенсаційний ферозонди необхідно як можна ближче один до одного. При цьому вони мають взаємний вплив один на одного, що, зрештою, знижує коефіцієнт перетворення ферозондів.

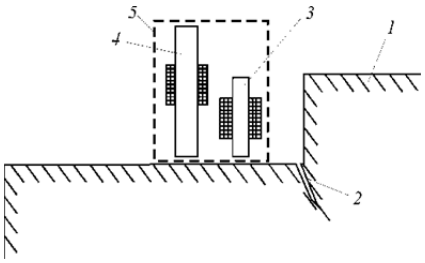

Рис. 2. Принцип компенсації поля завади за допомогою додаткового ферозонду (компенсаційного):
1 – контрольована деталь; 2 – дефект; 3 – ферозонд;
4 – компенсаційний ферозонд; 5 – корпус

Поверхня осі контролюється вимірювальним перетворювачем, що містить П-образний електромагніт і систему ферозондів, контроль робиться в залишковому полі. В якості джерела зондуючого полю може також використовуватися накладна котушка. Блок-схема обробки вихідних сигналів ферозондів, основного і компенсаційного, показана на рис. 3. Вихідні сигнали ферозондів проходять традиційну обробку з виділенням другої гармоніки. Канали обробки ферозондів ідентичні.

Вимірювальний перетворювач для виявлення дефектів осей колісних пар показаний на рис. 4. Він складається з пластмасового корпусу (обойми) 1, який знаходиться у феромагнітному екрані 2. Екран потрібний для зменшення впливу завад. Два ферозонди 3, 4 розміщені в спеціальній ніші. Один ферозонд – компенсаційний, довжина його осердь складає 22 мм, за рахунок чого він практично нечутливий до поля розсіяння дефекту. Другий ферозонд має осердя завдовжки 2,5 мм і є основним. Обмотки ферозонду включені за схемою полеміра. Показано, що при тріщинах з розкриттям до 0,1 мм градієнтометричний метод виявляється непрацездатним, а при розкритті дефектів більше 0,1 мм, виявлення дефектів градієнтометричним методом на 40-60% гірше, ніж запропонованим компенсаційним [10]. Проте значною мірою чутливість компенсаційного ферозонду до поля дефекту зберігається, до того ж через істотну різницю в довжинах сердечників основного і компенсаційного ферозондів з'являється складність при компенсації завади.

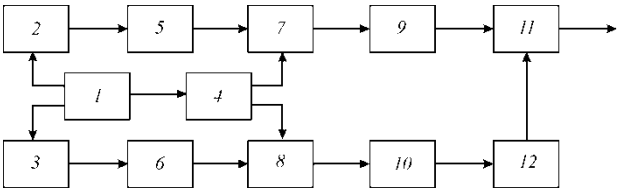

Рис. 3. Блок-схема дефектоскопа:
1 – генератор збудження; 2, 3 – основний і компенсаційний ферозонди; 4 – подвоювач частоти; 5, 6 – підсилювачі другої гармоніки; 7, 8 – фазові детектори; 9, 10 – підсилювач постійного струму; 11 – пристрій компенсації; 12 – пристрій формування компенсаційного сигналу

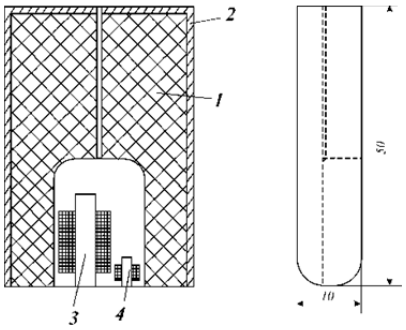

Рис. 4. Конструкція вимірювального перетворювача дефектоскопа для контролю деталей із ступінчастою поверхнею: 1 – корпус; 2 – екран; 3 – компенсаційний ферозонд; 4 – основний ферозонд

Інше вирішення проблеми підвищення завадостійкої ферозондових дефектоскопів при контролі осей колісних пар запропоноване в [12]. Для здійснення достовірного контролю дефектів при високому градієнті напруженості поля магнітної завади необхідно використовувати два ферозонди, один з яких чутливий як до поля дефекту, так і до поля завади, а другий – тільки до поля завади. Для цього в якості вимірювального перетворювача ферозондового дефектоскопа пропонується використовувати блок магнітної системи, що складається з двох ідентичних ферозондів з U-образними осердям (рис. 5). Вихідні обмотки двох ферозондів включаються за диференціальною

схемою. Ферозонд, чутливий до поля дефекту, називається вимірювальним, другий, такий, що має низьку чутливість до поля дефекту і достатню чутливість до поля завади, є компенсаційним.

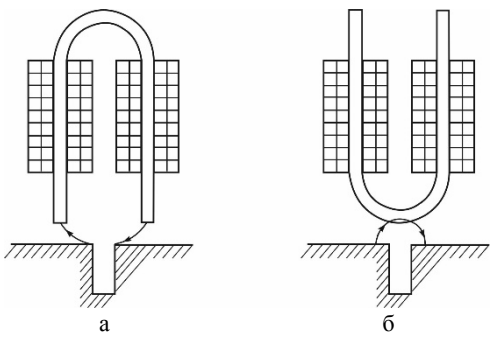

Рис. 5. Магнітні системи вимірювального (а) і компенсаційного ферозондів (б)

У магнітопроводі вимірювального ферозонду (а) поле розсіяння дефекту замикається через все осердя, утворюючи магнітний потік в магнітопроводі осердя, який зчеплений з обмотками ферозонду. У компенсаційному ферозонді (б) перемичка осердь шунтує магнітний потік, що створюється дефектом, і з котушками зчеплена тільки мала частина потоку, тому компенсаційний ферозонд практично не реагує на поле дефекту, яке зосереджене в малій області в околиці дефекту.

Магнітне поле завади розподілене в області, яка у багато разів перевищує об'єм осердь, тому на поле завади і основний, і компенсаційний ферозонди реагують приблизно однаково. Як видно з рис. 5, вимірювальний ферозонд має перемичку осердь згори, тобто в протилежній стороні від дефекту, у компенсаційного ферозонду (б) перемичка осердь знаходиться у безпосередній близькості від дефекту і шунтує поле дефекту. Тому чутливість компенсаційного ферозонду до поля дефекту практично відсутня. В той же час чутливість компенсаційного ферозонду до поля магнітної завади така ж, як і у основного ферозонду. Оскільки магнітні системи двох ферозондів ідентичні, можлива повна компенсація магнітного поля завади при збереженні сигналу дефекту. Розташування ферозондів над дефектом показане на рис. 6.

Слід зазначити, що наступною складністю при використанні ферозондового методу контролю усієї циліндричної поверхні осі колісної пари є спосіб переміщення ферозонду по цій поверхні. При контролі ступінчастої деталі для кожної ділянки, що має постійний діаметр, потрібний окремий ферозонд, оскільки переміщення ферозонду через сходинку і установка на поверхню нової ділянки викликає технічні труднощі. Необхідно також, щоб циліндрична деталь оберталася і ферозонд переміщався по поверхні деталі. При контролі осей колісних пар доцільно обертати її навколо осі з певною кутовою швидкістю ω. В цьому випадку один оборот осі відповідатиме одному фрагменту контролю.

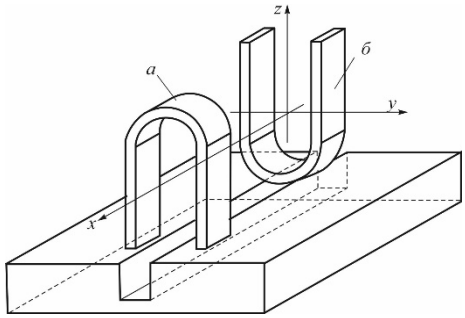

Рис. 6. Розташування ферозондів над дефектом

Висновки. Проведений у статті аналіз показав, що можна виділити три наступних підходи до усунення магнітних завад при ферозондовому контролі дефектів в осях колісних пар: використання схемних рішень при включенні ферозондів; фільтрація сигналів з ферозонду за допомогою цифрових фільтрів; застосування конструктивних удосконалень блоку ферозондових датчиків. Використання додаткових компенсаційних ферозондів різних геометричних розмірів та форм відкриває найбільш широкі можливості для компенсації магнітного поля завади при зберіганні сигналу дефекту. Напрямком подальших досліджень є визначення способу переміщення ферозонду по поверхні об’єкту складної геометричної форми, що необхідно для автоматизації процесу контролю.

Л і т е р а т у р а

1. Останин С.Н. Неисправности вагонных колесных пар и их элементов / С.Н. Останин // Вагонный парк. – 2015. – № 9-10 (102-103). – С. 32-36.
2. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм. ВНД 32.0.07.001-2001 (Нова редакція). – К., 2011. – 168 с.
3. Мищенко В. П. Установка автоматизированная для комплексного неразрушающего контроля колесных пар вагонов СНК КП-8. Опыт эксплуатации на предприятии ГП «Укрспецвагон» / В. П. Мищенко, А. В. Свистун // Неразрушающий контроль. – 2012. – № 1. – С. 4-13.
4. Інструкція по магнітному контролю відповідальних деталей тягового рухомого складу залізниць України (затверджено наказом "Укрзалізниці" від 04.03.03 р. №60-Ц). – К., 2003. – 87 с.
5. Ершов С. Г. Современные автоматизированные установки автоматизированного магнито-порошкового контроля концов и торцов труб / С. Г. Ершов // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №3. – С. 32-37.
6. Борзилов І. Д. Підвищення якості неруйнівного контролю осей колісних пар вагонів за допомогою коерцитиметрії / І. Д. Борзилов, К. В. Шевченко, В. Ю. Калитюк // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2014. – Вип. 147. – С. 27-31.

7. ГОСТ 21104-75. Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод. Москва. Дата введения 1976-07-01.
8. Шевченко О. І. Удосконалювання системи діагностики осей колісних пар рухомого складу залізниць методом ферозондової дефектоскопії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.07 «Рухомий склад залізниць і тяга поїздів» / О.І. Шевченко. – Луганськ, 2004. – 20 с.
9. Реутов Ю. Я. Об эффективности борьбы с помехами путем градиентометрического соединения магниточувствительных элементов / Ю.Я. Реутов, А.А. Литвиненко// Дефектоскопия. – 1989. – №3. – С. 76–82.
10. Шевченко А. И., Яковенко В. В., Тхафер Басим. Дефектоскоп для контроля осей колёсных пар подвижного состава / А. И. Шевченко, Яковенко В. В., Тхафер Бассим // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2002. – № 1(47). – С. 25-27.
11. Жученко Н.О. Удосконалювання систем дефектоскопії деталей ходової частини рухомого складу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / Н.О. Жученко. – Луганськ, 2007. – 23 с.
12. Безкоровайний В.С. Підвищення перешкодостійкості ферозондових дефектоскопів до магнітних полів перешкод: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 / «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / В. С. Безкоровайний. – Харків, 2015. – 24с.

References

1. Ostanin S. N. (2015). Neispravnosti vagonnyh kolesnyh par i ih yelementov [Disrepairs of carriage wheelpairs and their elements] *Vagonnyi park – Carriage park, 9-10 (102-103)*, *32-36* [in Russian].
2. VND 32.0.07.001-2001. Instruktsiia z formuvannia, remontu ta utrymannia kolisnykh par tiahovoho rukhomoho skladu zaliznyts Ukrainy kolii 1520 mm. Nova redakcija [Instruction for formation, repair and examination of wheel couples of traction rolling stock of the railroads of Ukraine of a track of 1520 mm. New release]. Kiev. 2011.
3. Mishenko, V. P., Svistun, A.V. (2012). Ustanovka avtomatizirovannaja dlja kompleksnogo nerazrushayushego kontrolja kolesnyh par vagonov SNK KP-8. Opyt yekspluatacii na predprijatii GP «Ukrspecvagon» [Automated setting for complex non-destructive testing of wheelpairs of carriages СНК КП-8. Experience of exploitation on the enterprise of SE "Ukrspetsvagon"] *Nerazrushayushii control – Non-destructive control*, *1*, *4-13* [in Russian].
4. Nakaz "Ukrzaliznytsi" vid 04.03.03 r. №60-Ts “Instruktsiia po mahnitnomu kontroliu vidpovidalnykh detalei tiahovoho rukhomoho skladu zaliznyts Ukrainy” [The order "Ukrainian railroads" of 04.03.03 № 60-Ts “Instruction for magnetic monitoring of responsible details of the traction rolling stock of the railroads of Ukraine”]. Kiev. 2003.
5. Ershov S. G. (2004). Sovremennye avtomatizirovannye ustanovki avtomatizirovannogo magnitoporoshkovogo kontrolja koncov i torcov trub [Modern automated options of the automated magnetic powder control of ends and butt ends of pipes] *V mire nerazrushayushego* kontrolja – *In the world of non-destructive control, 3, 32-37* [in Russian].
6. Borzylov I. D., Shevchenko K. V., Kalytiuk V. Yu. (2014). Pidvyshchennia yakosti neruinivnoho kontroliu osei kolisnykh par vahoniv za dopomohoiu koertsytymetrii [Upgrading of non-destructive testing of axes of wheelpairs of carriages by means of koertsitimetriya] *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT – Collection of scientific works УкрДАЗТ, 147, 27-31* [in Ukrainian].
7. GOST 21104-75. Kontrol' nerazrushayushii. Ferrozondovyi metod [State Standard 21104-75. Nondestructive testing. Ferroprobe method]. Moscow. Stadartinform Publ., 1976.
8. Shevchenko O.I. (2004). Udoskonaliuvannia systemy diahnostyky osei kolisnykh par rukhomoho skladu zaliznyts metodom ferozondovoi defektoskopii [Improvement of system of diagnostics of axes of wheel couples of the rolling stock of the railroads by method of a ferroprobe defectoscopy]. *Extended abstract of candidate’s thesis. Luhansk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University* [in Ukrainian].
9. Reutov Yu.Ja., Litvinenko A.A. (1989). Ob yeffektivnosti bor'by s pomehami putem gradientometricheskogo soedinenija magnitochuvstvitel'nyh yelementov [About efficiency of fight against interfence by the way of gradient metrical connection of magnetosensing elements]. *Defektoskopija – Defectoscopy, 3, 76–82* [in Russian].
10. Shevchenko A.I., Jakovenko V.V., Thafer Basim. (2002). Defektoskop dlja kontrolja osei kolyosnyh par podvizhnogo sostava [Defectoscope for monitoring of axes of wheel couples of the rolling stock]. *Visnik SNU im. V. Dalja – The SNU bulletin of V. Dahl, 1 (47), 25-27* [in Russian].
11. Zhuchenko N.O. (2007). Udoskonaliuvannia system defektoskopii detalei khodovoi chastyny rukhomoho skladu [Improvement of systems of defectoscoping details of a running part of a rolling stock]. *Extended abstract of candidate’s thesis. Luhansk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University* [in Ukrainian].
12. Bezkorovainyi V.S. (2015). Pidvyshchennia pereshkodostiikosti ferozondovykh defektoskopiv do mahnitnykh poliv pereshkod [Improving the noise immunity of fluxgate flaw detectors to interference’s magnetic fields]. *Extended abstract of candidate’s thesis. Kharkiv* [in Ukrainian].

Шведчикова И.А., Шевченко А.И., Никитченко И.В. Анализ подходов к устранению магнитных помех при феррозондовом контроле осей колесных пар

В статье определены и проанализированы основные подходы к уменьшению или устранению магнитных помех при феррозондовом контроле дефектов в осях колесных пар. По результатам сравнительного анализа выделены три основных направления устранения магнитных помех: использование схемных решений, фильтрация сигналов с феррозондов с помощью цифровых фильтров и конструктивные усовершенствования блока феррозондовых датчиков. Показано, что наиболее универсальным направлением уменьшения магнитных помех являются конструктивные усовершенствования феррозондовых датчиков, варианты технической реализации которых предложены в статье.

Ключевые слова: *ось колесной пары, дефект, неразрушающий контроль, помеха, магнитное поле, феррозонд.*

Shvedchykova I.O., Shevchenko O.I., Nikitchenko I.V. Analysis of approaches to removing of magnetic interference under fluxgate testing of axes of wheel pairs

Analysis of known approaches to removing of magnetic field interference in the case of fluxgate testing of defects such as discontinuity in the axes of wheel pairs. The method of qualitative comparative analysis to the estimation of the effectiveness of approaches to removing of magnetic field interference due to the stepped surface of the wheel pair axis during the fluxgate testing is used. Based on the results of the comparative analysis, three main approaches to the elimination of magnetic interference in the case of fluxgate testing of defects in the axes of wheel pairs have been identified: the use of circuit solutions, filtering signals from the fluxgate using digital filters and use of structural improvements in the block of fluxgates. The main approaches to the reducing or removing of magnetic interference during the fluxgate testing of wheel pair's axes are determined and analyzed. Based on this analysis, options for their technical implementation are proposed. The results of the research can be used for creation new constructive varieties of interference resistant magnetosensitive sensors based on fluxgates for wheelsets of rolling stock.

Keyword: *axis of wheel pair, defect, nondestructive testing, interference, magnetic field, fluxgate.*

Шведчикова І.О. – д.т.н., професор кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, ishved89@gmail.com

Шевченко О.І. – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, alexshev2014@i.ua

Нікітченко І.В. – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, inna.mia.lg@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. ***Соколов В.І.***

Стаття подана 06.05.2018