ISSN 1232-3829
tts 10/2013
Technika Transportu Szynowego koleje ▪ tramwaje ▪ metro

LESIAK Piotr, WLAZŁO Marek

BADANIA I ANALIZA FOURIERA SYGNAŁÓW WAD HEAD CHECKING W SKATEROMETRII LASEROWEJ SZYN

Streszczenie

W artykule wykazano celowość badań wad head checking zlokalizowanych na powierzchni tocznej szyn kolejowych. Zaproponowano do tego celu metodę skaterometrii laserowej. Zaprezentowano wzorce i model fizyczny rozproszenia wiązki lasera na takich wadach. Dokonano laboratoryjnych badań eksperymentalnych. Otrzymane wyniki poddano transformacji fourierowskiej i dokonano ich analizy. Wskazano dalsze kierunki badań w oparciu o sygnały dwuwymiarowe.

WSTĘP

Wada *head checking* (HC) należy do grupy wad kontaktowo-naprężeniowych (*ang. Rolling Contact Fatigue – RCF*). Jej przyczyną jest cykliczna zmiana obciążenia szyny, poprzez przejeżdżający tabor. Wskutek tego następuje zmęczenie kontaktowe powierzchni tocznej szyny, które jest jedną z przyczyn powstawania na jej powierzchni uszkodzeń.

Początkowo powstają mikropęknięcia. Zwykle są one widoczne na znacznej długości toru, i występują prawie równolegle, blisko siebie, a ich długość wynosi 10-15 mm [13]. Jeszcze do pierwszej połowy lat 90 – tych ubiegłego wieku, nie zaliczano ich w Europie do najczęściej zgłaszanych [1], to obecnie są obok squatów i shellingów dominującymi wadami *RCF*, również na polskich kolejach.

Wady HC występują na głębokości od ułamka do kilku mm od powierzchni tocznej szyny czyli płaszczyzny obserwacji. Mikropęknięcia z czasem postępują i rozwijają się w głąb szyny, krytycznie doprowadzając do jej złamania. Dlatego w porę niewykryte wady head checking mogą stanowić duże zagrożenie eksploatacyjne w ruchu pojazdów szynowych. Znane są przypadki złamania szyn i wypadków kolejowych, których przyczyną były wady HC. Przykładem może być wypadek w bieżącym roku (2013), na szlaku Jastrząb-Szydłowiec koło Radomia (linia nr 08) szerzej opisany w pracy [8]. Zdjęcia ze zdarzenia koło Radomia pokazano na rys. 1c i d.

Dotychczasowe metody diagnostyki wad powierzchniowych stosowane przez PKP PLK S.A. oraz inne zarządy kolejowe, tylko w ograniczonym stopniu zdają egzamin. Najpopularniejsza metoda ultradźwiękowa, jedyna stosowana w Polsce diagnostyka szynowa, pozwala na wykrycie tylko 40 % wszystkich wad powierzchniowych, uwzględniając najpopularniejsze wady typu squat i shelling. Kwalifikuje to metodę ultradźwiękową, jako mało skuteczną przy wykrywaniu wad powierzchniowych główki szyny.

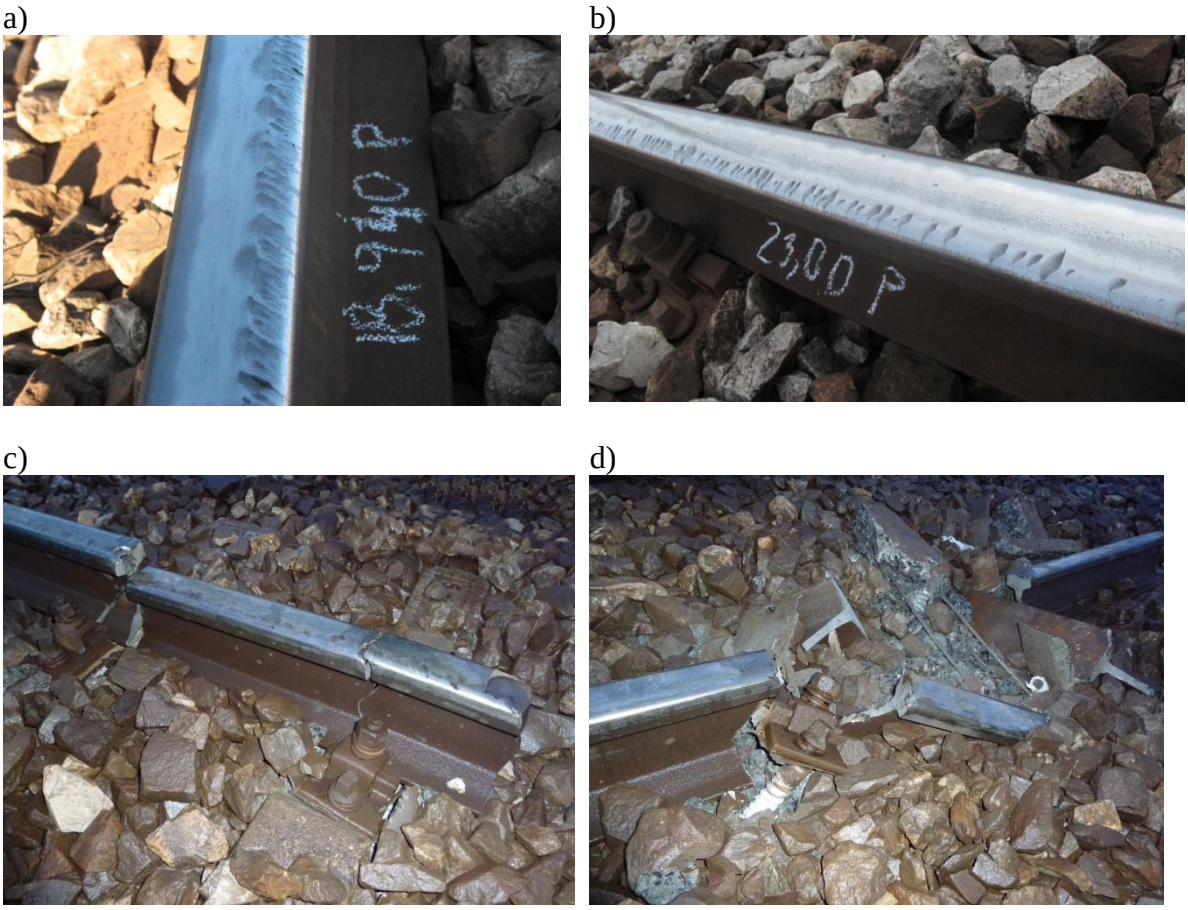
Z grupy metod magnetycznych, metoda prądów wirowych, wymaga stałej odległości czujnika od tej powierzchni, co też jest praktycznie niemożliwe do zrealizowania w przypadku badań eksploatacyjnych tych wad. Natomiast metoda pamięci magnetycznej, jest

we wstępnej fazie badań i trudno ją obecnie ocenić, a wymagania są zbliżone jak w przypadku prądów wirowych [10].

Czynione są też próby wykorzystania do detekcji wad *RCF* metod wizyjnych, szczególnie typu squat [2].

W ramach poszukiwań doskonalszej metody diagnostycznej, dedykowanej szczególnie do wykrywania wad powierzchniowych, autorzy zaproponowali oryginalną metodę skaterometrii laserowej.

W pracy zaprezentowano system badawczy i wykonano badania eksperymentalne na wzorcach wad HC metodą skaterometrii laserowej w wersji uproszczonej (w pojedynczym wymiarze). Zamodelowano na szynie mechanicznie mikroszczeliny o różnej szerokości *d*, począwszy od 100 μm do 850 μm. symulującymi wady HC, rys. 2. Przeprowadzono analizę fourierowską wyników pomiarowych i wykazano jej zalety.



Rys. 1. Przykłady HC w torze kolejowym: a) i b) wady HC; c) i d) wielokrotne złamanie szyny wskutek wad HC (źródło własne autorów)
Źródło**:** [8]

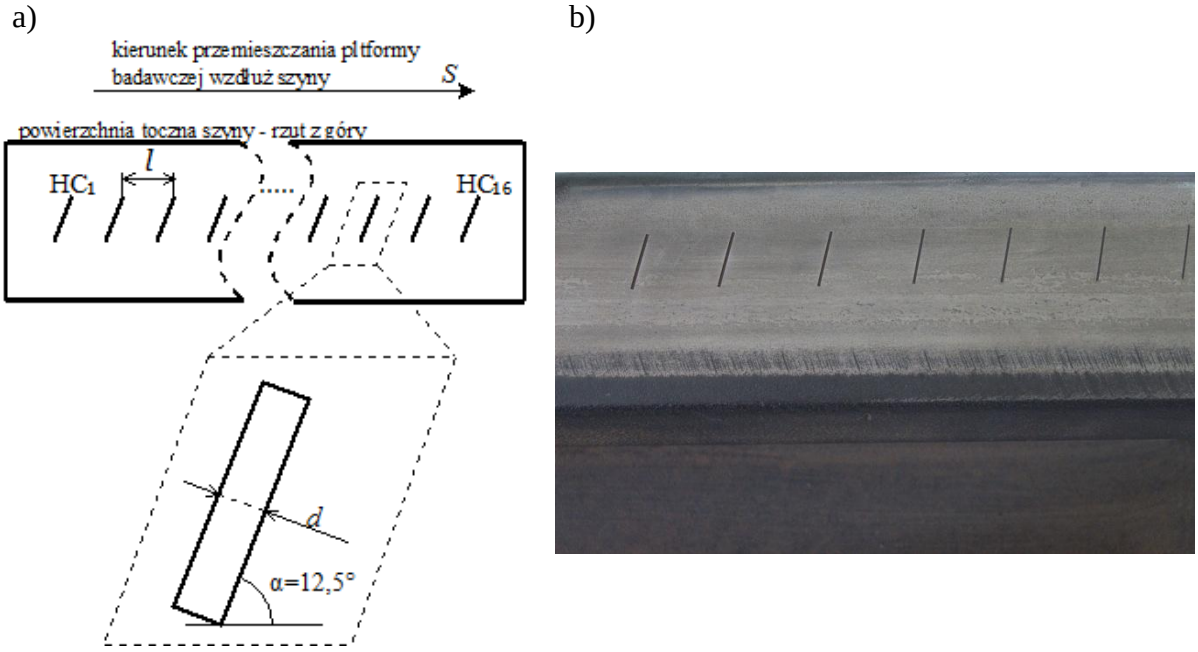
1. SYSTEM BADAWCZY

W pracy zastosowano zredukowany wariant skaterometrii laserowej, polegający na rejestrowaniu przez pojedynczy detektor (fotodiodę PIN) światła rozproszonego, które zbierane jest z określonego, niewielkiego kąta bryłowego. Szerzej model optyczny skaterometrii laserowej wzorców wad został opisany w innej pracy autorów [8].

Zakłada się, że powierzchnia toczna główki szyny traktowana jest jak powierzchnia gładka i światło od niej odbite traktuje się, jako odbicie zwierciadlane, rys. 3a, natomiast dno

wzorca wady HC jest powierzchnią lambertowską (idealnie chropowatą) i światło od niej odbite jest światłem rozproszonym we wszystkich kierunkach, rys. 3b.

Do badań laboratoryjnych użyto wycinka szyny kolejowej wyjętej z toru, na której wykonano modele wad powierzchniowych typu head checking, zgodnie z rys. 2. W sumie na szynie zlokalizowano 16 wzorców wad zaczynając od wady HC1 o szerokości *d* równej 100 μm, kończąc na wadzie HC16 o *d* = 850 μm ze skokiem o szerokości co 50 μm. Odstępy między wadami *l* wyniosły około 16 mm. Odległość taka pozwoliła na uniknięcie wzajemnych zakłóceń przy badaniach poszczególnych wad, szczególnie dla większych prędkości posuwu platformy badawczej.



Rys. 2. Wzorzec szyny z wadami HC: a) ilustracja poglądowa rozmieszczenia wad, b) badana szyna

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Aparatury Diagnostycznej Wydziału Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno – Humanistycznego w Radomiu [9].

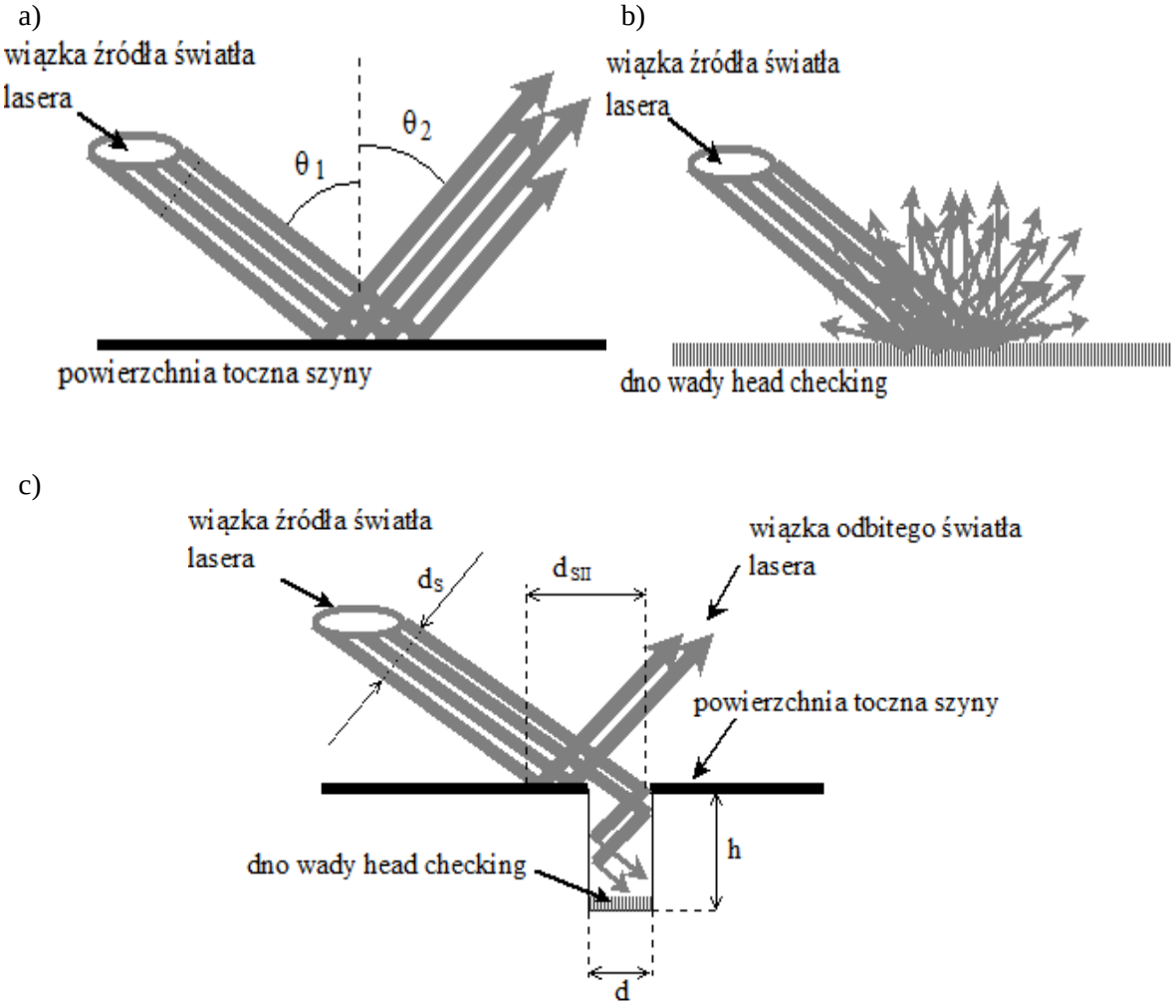
Jako źródło światła został wykorzystany laser wytwarzający wiązkę światła czerwonego o długości fali λ= 635 nm i mocy 20 mW (ADL 63201TL). Użycie do badań lasera małej mocy nie powoduje uszkodzeń powierzchni badanej [5]. Średnica d_S wiązki światła laserowego (rys. 3c.) nie została podana. Analizując wykresy rozproszenia światła na wadach wzorcowych, gdzie szczelina *d* jest określona, szacuje się, że średnica wiązki lasera padająca na powierzchnię szyny d_{SII} w płaszczyźnie obserwacji, mieści się w przedziale (500 - 700) μm. Na tej podstawie można obliczyć średnicę wiązki lasera d_S, jako:

$$d_S = d_{SII} \cos\theta_1 \tag{1}$$

gdzie: θ_1 – kąt padania wiązki lasera do normalnej (rys.3a).

Podstawiając odpowiednie wielkości do równania (1), wyznaczono średnicę wiązki lasera, która w przybliżeniu wynosi $d_S \approx (200 \pm 40)$ μm. Rolę odbiornika promieniowania laserowego odbitego od powierzchni badanej szyny pełni fotodioda PIN (ang. *Positive - Intrinsic – Negative Photodiode*).

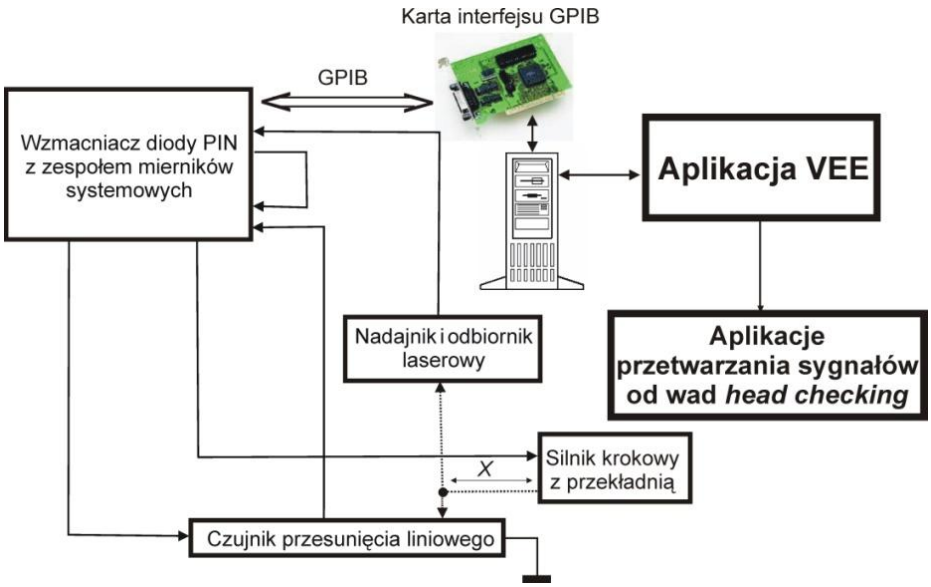
Para nadajnik – odbiornik tworzą tzw. platformę badawczą, która przesuwa się po prowadnicy wzdłuż szyny *X*, z krokiem ok. 10 μm. Nadajnik i odbiornik światła lasera ustawione są tak, że kąt padania wiązki laserowej θ_1 jest równy kątowi wiązki odbitej θ_2, rys.3a. W przeprowadzonych badaniach kąt ten został dobrany empirycznie i platforma badawcza została ustawiona z parametrami $\theta_1 = \theta_2 = 70°$. W określeniu kąta decydującą rolę odegrał poziom chropowatości powierzchni. Uważa się, że maksymalną czułość detekcji uszkodzeń powierzchni o różnym współczynniku chropowatości można uzyskać przy ustawieniach kąta ok. 60°, 70° [11].



Rys. 3. Odbicia wiązki lasera od powierzchni szyny: a) od powierzchni zwierciadlanej, b) od powierzchni chropowatej (lambertowskiej), c) w obecności wady HC

Do pomiaru zastosowano systemowe przyrządy firmy Agilent, które komunikują się z komputerem za pośrednictwem karty interfejsu GPIB [9], rys.4.

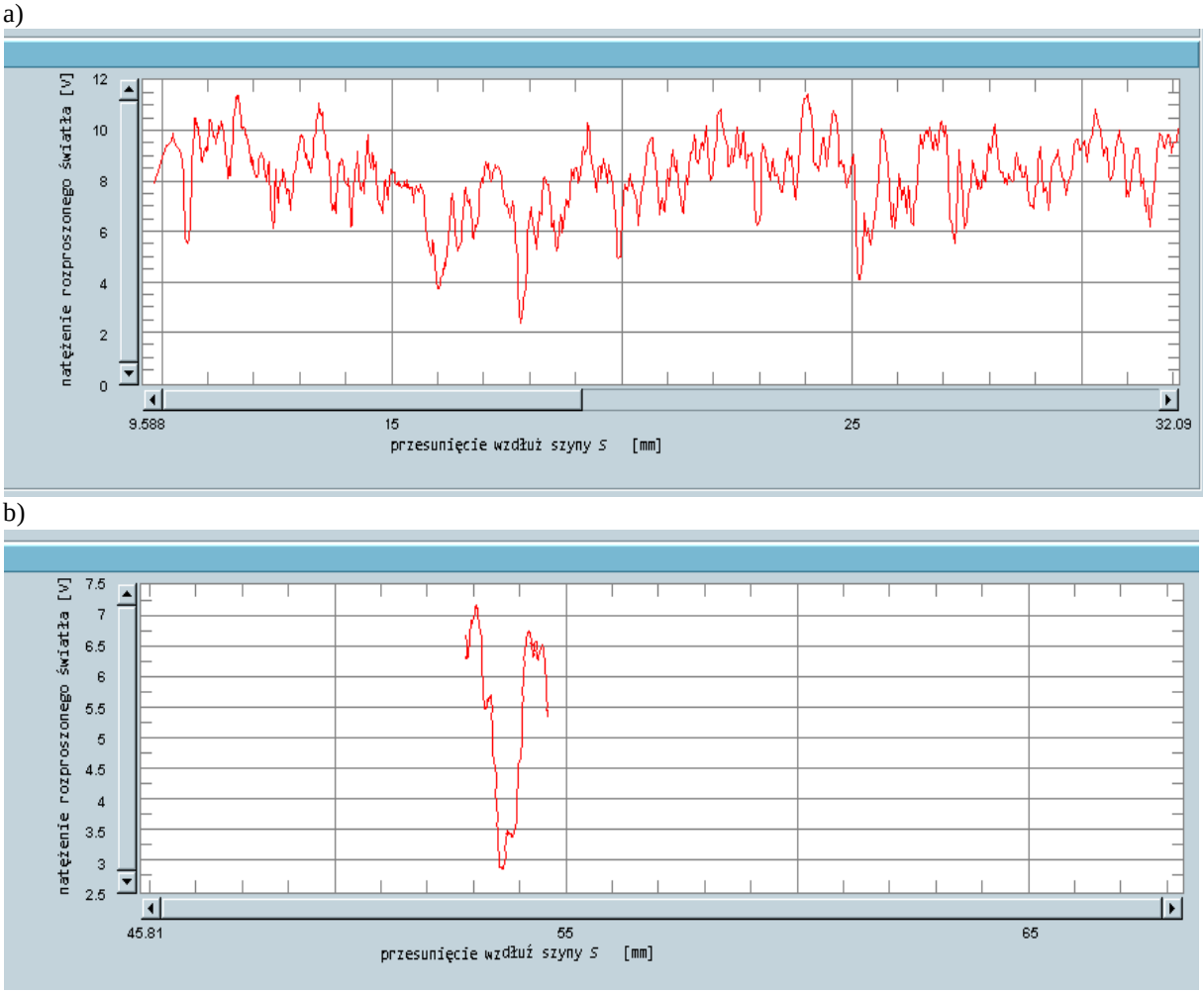
Napęd platformy badawczej zrealizowano poprzez przekładnię ślimakową o znaczącym przełożeniu, napędzaną silnikiem krokowym. Czujnik przesunięcia platformy stanowił potencjometr podłączony do zasilacza i jednego z multimetrów, wyskalowanego w jednostkach długości - mm. Wartość natężenia światła lasera rejestrowaną przez detektor i przetworzoną na amplitudę sygnału napięciowego, po wzmocnieniu, mierzy kolejny multimetr. Całością systemu steruje komputer z zaimplementowaną aplikacją pomiarową LASER, utworzoną w zintegrowanym graficznym środowisku programowym VEE Pro, rys. 5.



Rys. 4. Konfiguracja systemu do badania wad w szynach kolejowych uproszczoną metodą skaterometrii laserowej
Źródło: [7]

a)

b)



Rys. 5. Ekrany aplikacji pomiarowej VEE Pro przy pomiarze wad: a) ciągu wad HC b) wzorca wady pojedynczej

2. ANALIZA FOURIERA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania przeprowadzono w jednym wymiarze wzdłuż powierzchni tocznej szyny. Źródło wiązki lasera ustawiono pod kątem $\theta_1 = 70°$ do normalnej. Dla takich ustawień, szerokość plamki na płaszczyźnie obserwacji d_{SII} jest rozmiarów z zakresu od 0,5 do 0,7 mm. Oznacza to, że wiązka lasera padająca na płaszczyznę badaną, przy badaniu wad HC1, HC4, HC8 jest większa od wady, których wymiar d ma odpowiednio wartości: 100, 250, 450 μm. Wynika z tego, że w każdej chwili czasu, część wiązki lasera odbija się od powierzchni tocznej, uznawanej z założenia, jako powierzchnia zwierciadlana. Przedstawiony opis został zilustrowany na rys. 3c, gdzie powierzchnia oświetlana wiązką lasera jest szersza od szerokości szczeliny d.

Analizując wadę HC14, dla której d = 750 μm, wystąpił przypadek, gdzie wiązka laserowa d_{SII} jest mniejsza od szerokości szczeliny d. Natężenie światła rozproszonego docierającego do fotodetektora PIN powinno osiągać globalne minima i rzeczywiście, można to zauważyć analizując poszczególne charakterystyki wad HC – rys. 6.

W skrajnych przypadkach szczelina taka może zachowywać się jak model ciała doskonale czarnego [12]. W każdym z tych przypadków natężenie promieniowania laserowego rozproszonego na modelu wady docierającego do detektora jest mniejsze. Oznacza to, że światło natrafiając na wadę powierzchni ulega zjawiskom fizycznym powodującym zmniejszenie jego natężenia docierającego do detektora układu pomiarowego.

Analiza cech nierówności została przeprowadzona programem do numerycznej analizy częstotliwościowej sygnałów, wykorzystując szybkie przekształcenie Fouriera FFT (*ang. Fast Fourier Transformat*). Aplikacja pozwala na wprowadzenie analizowanych próbek z pliku tekstowego, poddanie ich dyskryminacji okienkowej i wykonaniu dyskretnej transformaty Fouriera, w postaci widma prążkowego, Ponadto program umożliwia analizę poszczególnych harmonicznych widma. Wykonanie transformaty odwrotnej daje możliwość pokazania, w jaki sposób poszczególne harmoniczne wpływają na przebieg. Wyniki całości powyższych działań można zapisać w pliku tekstowym. Aplikację do obliczeń FFT pokazano na rys. 7 [9].

Algorytm aplikacji przekształca skończony ciąg próbek sygnału $(a_0, a_1, \dots, a_{N-1}),\ a_i \in \mathbb{R}$ w ciąg harmonicznych $(A_0, A_1, \dots, A_{N-1}),\ A_i \in \mathbb{C}$, zgodnie ze wzorem [4, 14]:

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \omega_N^{-kn}, \quad 0 \le k \le N-1 \tag{2}$$

$$\omega_N = e^{j\frac{2\pi}{N}}$$

gdzie: k – numer harmonicznej, n – numer próbki sygnału, a_n – wartość próbki sygnału, N – liczba próbek

Odwrotne przekształcenie FFT wyrażone jest wzorem:

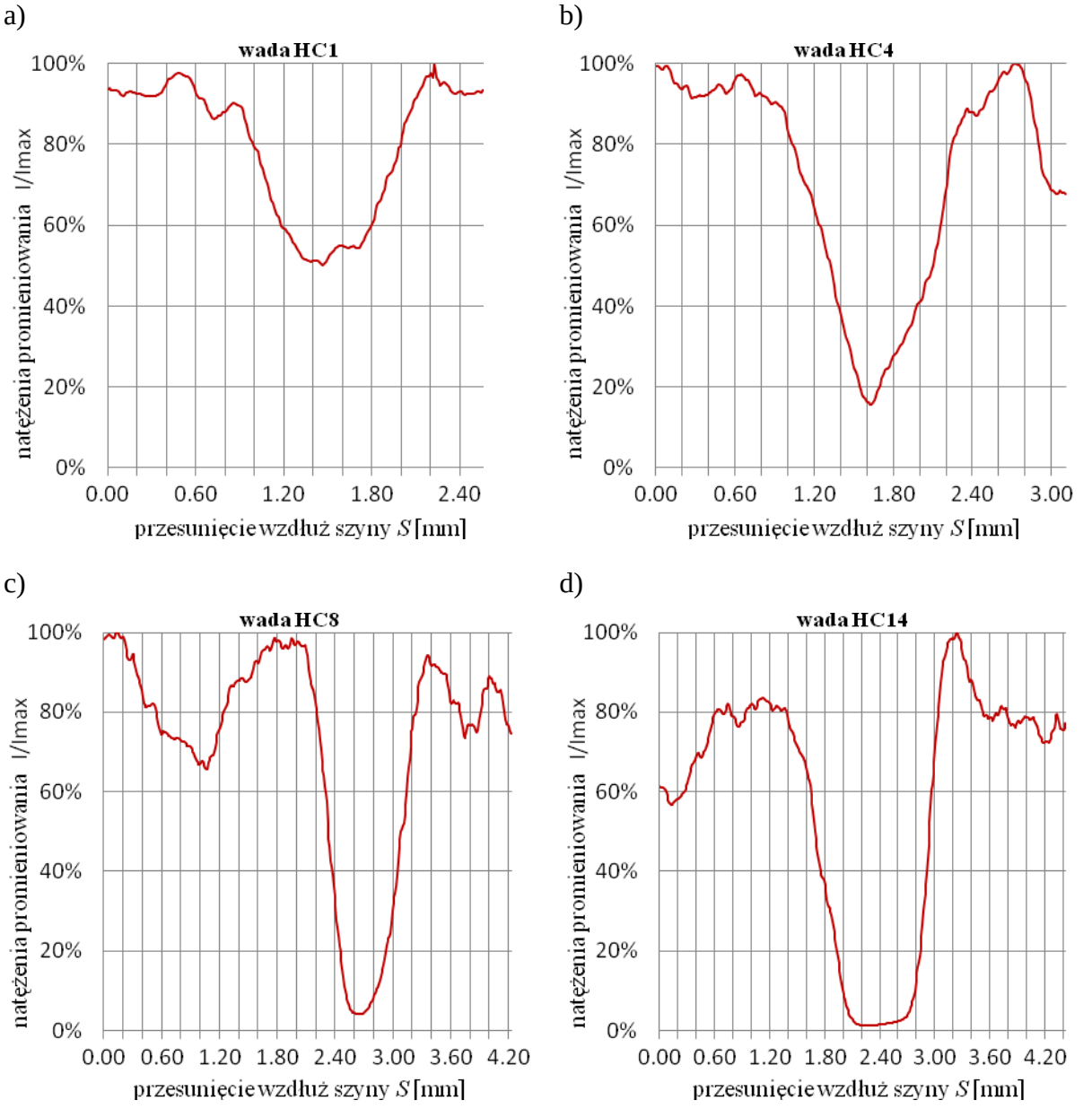
$$a_n \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A_k \omega_N^{kn}, \ \ 0 \le n \le N-1 \tag{3}$$

Analizując wyznaczono funkcję gęstości widmowej mocy. Zmienną niezależną jest przesunięcie, zmienną zależną jest amplituda nierówności, czyli zbiór zmiennych zarejestrowanych przez detektor [6]. Jest to wartość natężenia promieniowania laserowego odbitego od płaszczyzny obserwacji zarejestrowana na fotodetektorze PIN. Trzecią dziedziną uwzględnioną w analizie jest długość fali nierówności λ, pokazana na wykresach charakterystyk funkcji gęstości widmowej mocy, rys. 8.

Przeprowadzona analiza wydobywa cechy nierówności zarejestrowane metodą skaterometrii laserowej na wzorcach wad head checking. Otrzymane harmoniczne reprezentują tu poszczególne długości fal nierówności λ [3]. Zastosowanie w algorytmie przetwarzania filtracji dolnoprzepustowej, wyeliminuje zakłócenia w postaci nierówności powierzchni szyny w obrębie wady zobrazowane, jako prążki o wyższych harmonicznych.

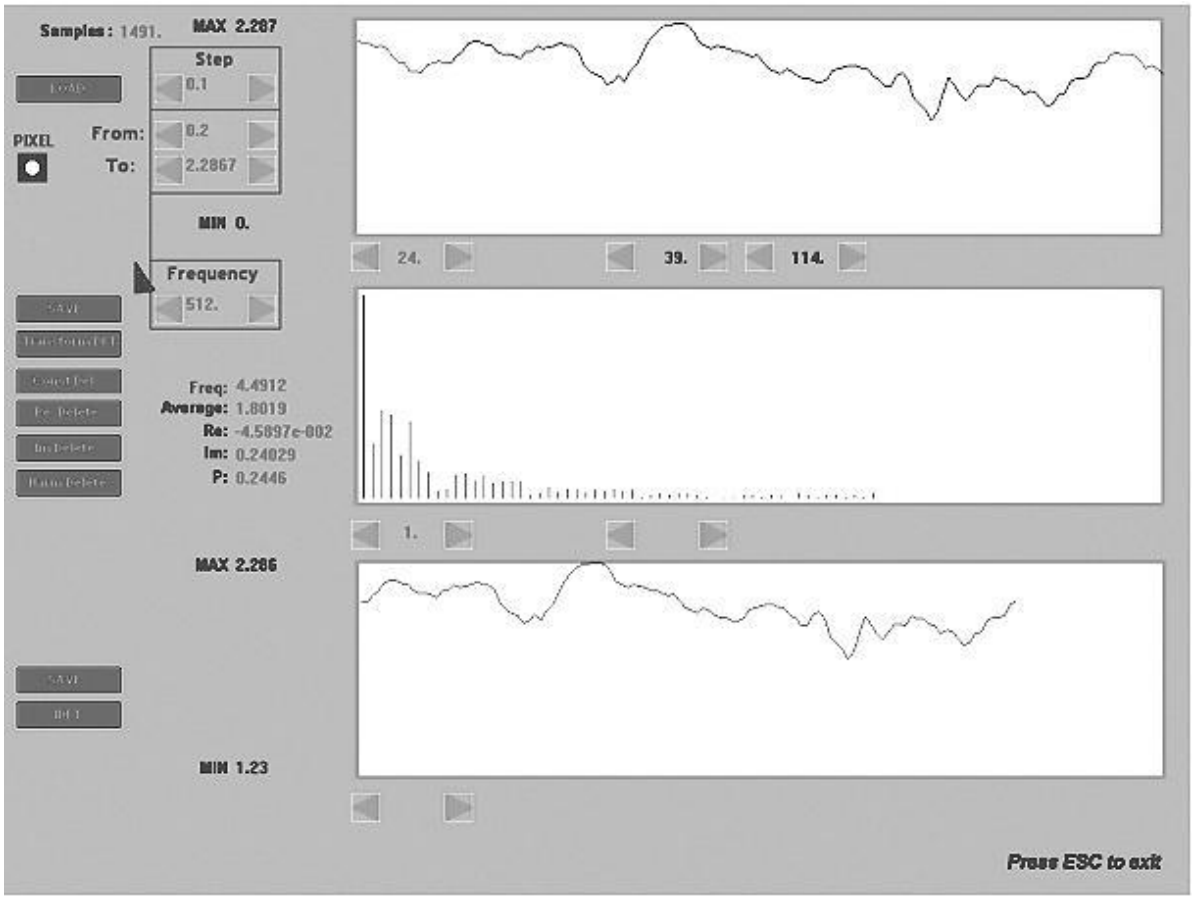
Finalna ekstrakcja informacji z sygnału, reprezentowana przez pierwszy prążek harmonicznej, pozwoli na właściwą klasyfikację danej wady, i jej przypisanie do określonej grupy (bezpieczna, niebezpieczna lub do obserwacji).

Toteż wykorzystanie sygnałów gęstości widmowej mocy sygnałów zarejestrowanych w torze kolejowym, stanowi innowacyjne podejście w diagnostyce szyn kolejowych metodą skaterometrii laserowej wad HC.

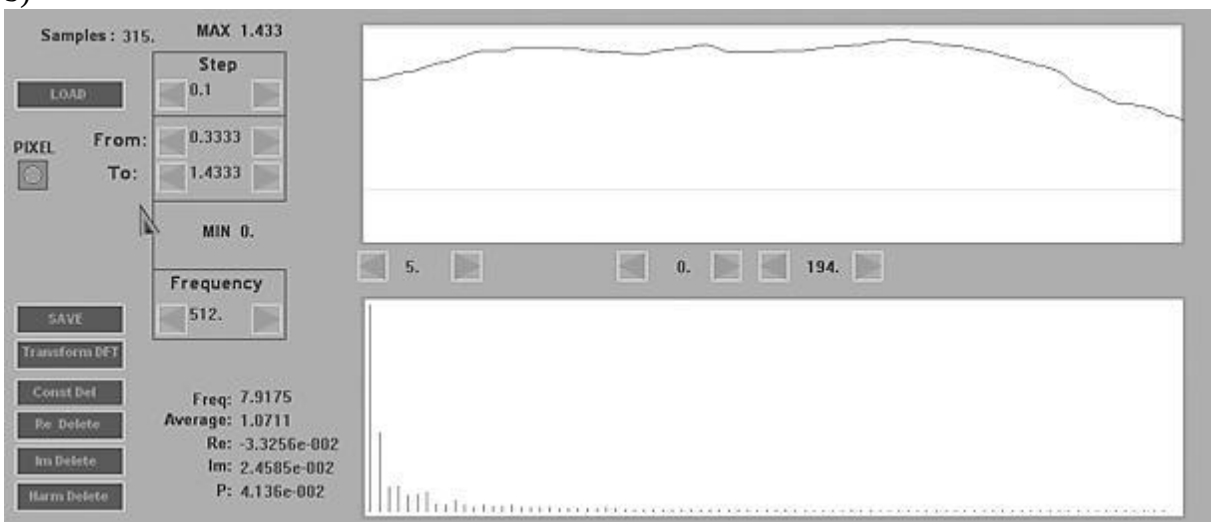


Rys. 6. Przebiegi sygnałów wad HC na fotodetektorze PIN, a) wada HC1 o szerokości szczeliny d = 0,1 mm, b) wada HC4 o szerokości szczeliny d = 0,25 mm, c) wada HC8 o szerokości szczeliny d = 0,45 mm, d) wada HC14 o szerokości szczeliny d = 0,75 mm

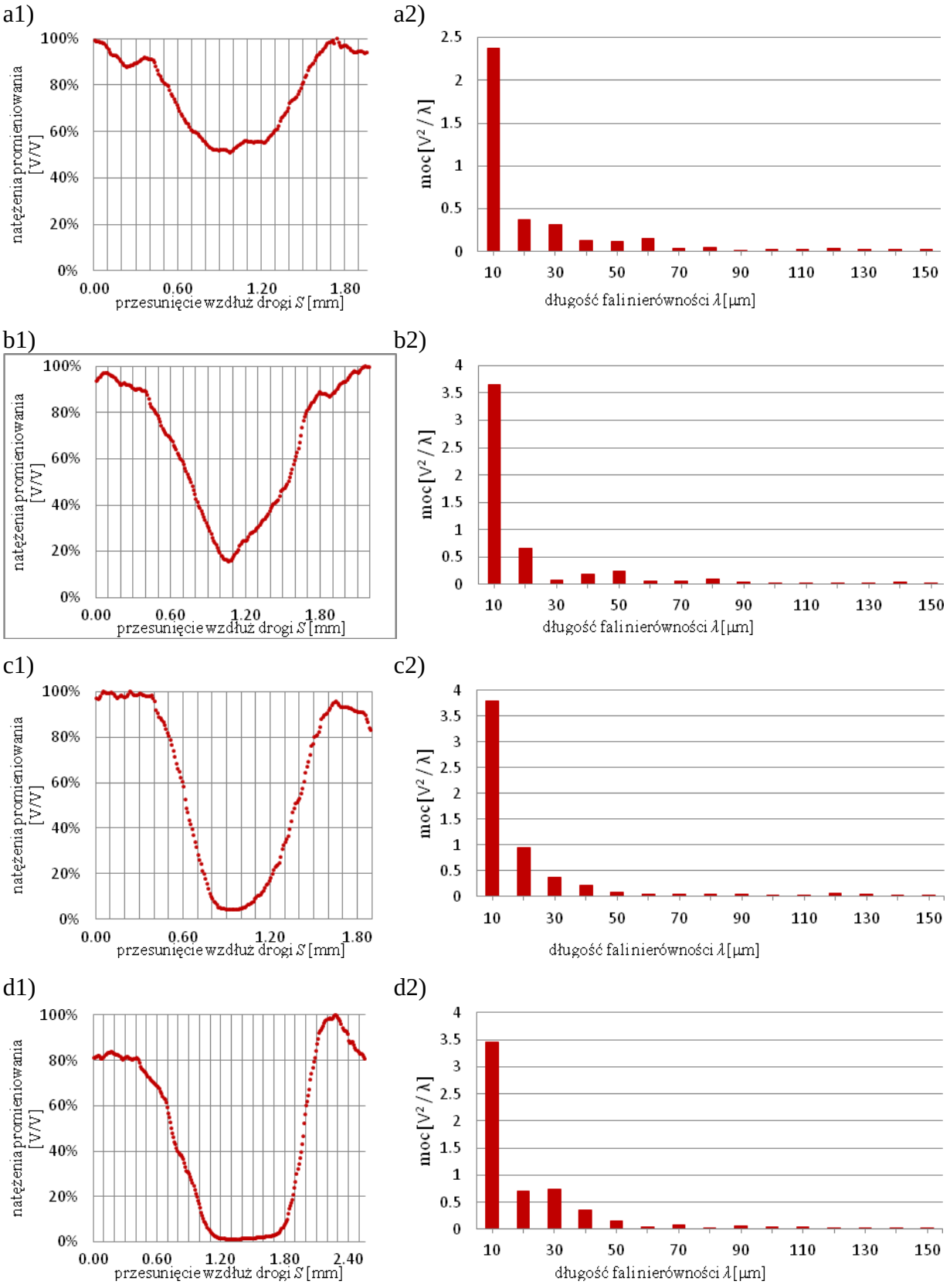
a)



b)



Rys. 7. Okna aplikacji do obliczeń FFT: a) przebieg ciągu wad HC z rys.5a. Okno górne - fragment analizowanego przebiegu, okno środkowe – transformacja Fouriera analizowanego przebiegu, okno dolne – fragment odwrotnej transformacji FFT, b) przebieg wady pojedynczej z rys. 5b - widoczny fragment przebiegu oraz jego transformacja FFT



Rys. 8. Ilustracja transformacji Fouriera wad HC: a1), b1), c1), d1) próbki przebiegu poddanego transformacji; a2), b2), c2), d2) funkcja gęstości widmowej mocy (ograniczona do pierwszych 15 harmonicznych)

PODSUMOWANIE

Dotychczas stosowane metody defektoskopowe cechują się zbyt małą skutecznością wykrywania wad powierzchniowych szyn. Dlatego potrzebne jest ciągłe poszukiwanie nowych, celem udoskonalenia badań diagnostycznych szyn kolejowych, również w perspektywie rozbudowujących się w Polsce liniach metra oraz prognozowanych kolei dużych prędkości. Przedstawiona przez autorów metoda skaterometrii laserowej, wychodzi temu naprzeciw. Jest metodą innowacyjną na skalę światową, a główną jej zaletą, jest brak kontaktu czujnika z szyną i praktycznie nieograniczona prędkość badań.

Przeprowadzone w pracy badania diagnostyczne wad HC w szynach kolejowych, oparte na analizie Fouriera, są pierwszy raz prezentowane przez autorów w środowisku transportowym. Wyznaczenie funkcji gęstości widmowej mocy wad pozwala na ekstrakcję dodatkowych informacji z sygnału, takich jak udział poszczególnych harmonicznych długości fali nierówności w obszarze wad HC.

Autorzy, będąc prekursorami takich badań, widzą potrzebę dalszego udoskonalania tej metody, zarówno w sferze rozwiązań technicznych, jak i pogłębionych analiz sygnałów. Wskazują kierunek dalszych prac w stronę poszerzenia obszaru badanego z jednowymiarowego na dwuwymiarowy, co wiązać się będzie z zaawansowanymi metodami przetwarzania obrazów.

BIBLIOGRAFIA

1. Allery, M.B.P. (1997) *Rail Failure Statistics for the Whole of the Railtrack Network 1969 to 1995*, BR Research Report: RR-TCE-084, January 1997.
2. Bojarczak P., *Wizyjna diagnostyka toru kolejowego*. Monografia, Wyd. ITE – PIB Radom, Radom 2013.
3. Crawford F. S. Jr.: *Fale*. PWN, Warszawa 1975.
4. Izydorczyk J., Płonka G., Tyma G.: *Teoria sygnałów.* Wydawnictwo Helion, 2006.
5. Jóźwicki R.: *Technika laserowa i jej zastosowania.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
6. Kisilowski J., *Podstawy technik pomiarowych.* Wydawnictwo Naukowe Obserwacje. Warszawa 2005.
7. Lesiak P., Szumiata T.: *Skaterometria laserowa wad head checking w szynach kolejowych*. PAKGOŚ nr 2/2010, s. 25-28.
8. Lesiak P., Wlazło M., *Model optyczny skaterometrii laserowej wzorców wad powierzchniowych szyn kolejowych.* Logitrans 2013, Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, nr 3/2013 (płyta CD).
9. Lesiak P.: *Inteligentne czujniki pomiarowo - diagnostyczne w aplikacjach transportu kolejowego. Etap II*. Politechnika Radomska temat nr 19399/47/P, Radom 2009.
10. Lesiak P.: *Mobilna diagnostyka szyn w torze kolejowym*. Monografia nr 116, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2008.
11. Moreno-Báez A., Miramontes-de León G., Sifuentes-Gallardo C., García-Domínguez E., Huerta-Ruelas J.A.: *A data driven model of laser light scattering in metallic rough surfaces*. International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(35), pp. 7857 - 7864, 23 December, 2011.
12. Nowak S.: *Zasady ruchu falowego akustyka i optyka*. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 1996.
13. *Rolling Contact Fatigue in Rails; a Guide to Current Understanding and Practice,* Railtrack PLC Guidelines: RT/PWG/001, Issue 1, 2001.
14. Stasiński S.: *O liczeniu dyskretnej transformacji Fouriera.* Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.

FOURIER ANALYSIS OF SIGNALS COMING FROM HEAD CHECKING FLAWS IN LASER SCATTEROMETRY OF RAILS

Abstract

The paper presents the necessity of investigation of head checking flaws occurring on the surface of the rail's head. The laser scatterometry was proposed to solve this task. The patterns and physical model of laser beam scattered in these flaws were presented. Laboratory experiments were conducted. Obtained results were analyzed with the use of Fourier transform. Further research areas basing on 2D signals were pointed out.

Autorzy:

dr hab. inż. **Piotr Lesiak,** prof. UTH – Wydziału Transportu i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu, e-mail: p.lesiak@uthrad.pl

mgr inż. **Marek Wlazło** – doktorant Wydziału Transportu i Elektrotechniki. Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu, e-mail: m.wlazlo@uthrad.pl