

Piotr Lesiak, Aleksander Sokołowski, Marek Wlazło

Dwuwymiarowa funkcja korelacji obrazów wad typu squat w diagnostyce szyn kolejowych metodą skaterometrii laserowej

W artykule zastosowano dwuwymiarową funkcję korelacji do oceny podobieństwa obrazów wad szyn kolejowych uzyskanych metodą skaterometrii laserowej. Obrazy te powstają w wyniku rozproszenia wiązki lasera. Jako obiekt badań wybrano wady kontaktowo-napreżeniowe typu squat. Proponowana metoda polega na porównaniu obrazu wady z obrazem jej wzorca. W obliczeniach funkcji korelacji tych obrazów, wykorzystano dwuwymiarową szybką transformację Fouriera. Transformaty obydwu obrazów pomnożono przez siebie. Następnie wyznaczono odwrotną transformatę, w wyniku której uzyskano obraz funkcji korelacji. Charakterystycznym efektem podobieństwa tych obrazów jest obraz z ostrym, wyrazistym pikiem. Wartość liczbowa tej funkcji stanowi miarę podobieństwa obrazów wady i wzorca. Ten oryginalny algorytm wyznacza nowe możliwości w diagnostyce szyn kolejowych.

Stan techniczny szyn kolejowych jest szczególnie istotny z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu pociągów. Powstające w warunkach eksploatacyjnych powierzchniowe wady kontaktowo-napreżeniowe RCF (ang. *Rolling Contact Fatigue*) są wyjątkowo niebezpieczne. Stają się one przyczyną pęknięć, przełomów i w rezultacie złamań szyn, co może prowadzić do wykolejenia pojazdów szynowych. O skali problemu świadczą liczby. Na liniach kolejowych PKP PLK SA, co roku notuje się kilkaset złamań szyn, będących skutkiem takich wad [4]. Podstawowym ich reprezentantem jest wada typu squat, która będzie przedmiotem badań autorów. Dlatego istotna jest skuteczna diagnostyka takich wad, czyli ich detekcja i ocena. W tym celu współautorzy zaproponowali oryginalną metodę skaterometrii laserowej [5]. W dotychczasowych pracach posługiwano się optycznym sygnałem jednowymiarowym [6]. Wykorzystano do tego celu jednowymiarową transformację Fouriera, poddając analizie widmowej sygnał pomiarowy wady typu squat [8].

W tym artykule wykorzystano dwuwymiarową transformację Fouriera, jako popularne narzędzie badawcze, stosowane w wielu dziedzinach nauki i techniki [1], a szczególnie w szeroko

ko pojętym przetwarzaniu obrazów [9]. Znane są jej podobne aplikacje m.in. w bezinwazyjnych badaniach chropowatości powierzchni [13]. Także w innych dziedzinach nauki, np. w medycynie transformata Fouriera wykorzystywana jest do wykrywania czerniaka w schorzeniach skóry [10, 11].

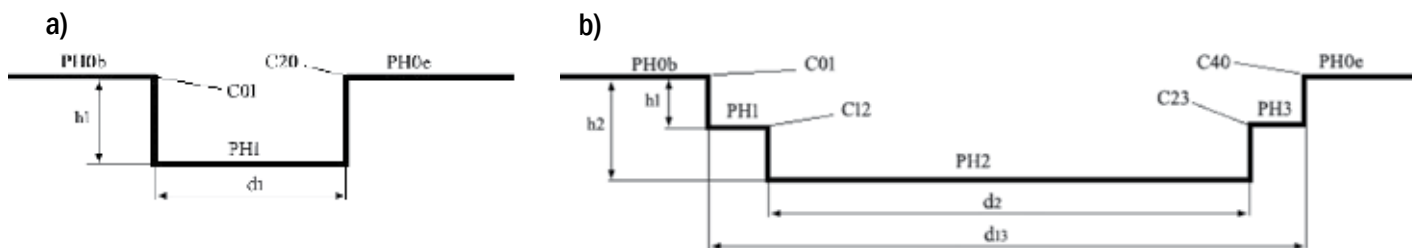
W swoich badaniach autorzy podjęli próbę zastosowania transformacji Fouriera w analizie obrazów skaterometrii laserowej wad typu squat. Posługując się autorskim oprogramowaniem A. Sokołowskiego, wyznaczono obrazy i wartości funkcji korelacji stanowiącej miarę podobieństwa wad i ich wzorców.

Skorzystano tu z wyników pomiarów, przeprowadzonych na specjalnie zbudowanym do tego celu, w pełni zautomatyzowanym stanowisku badawczym w Laboratorium Aparatury Diagnostycznej Wydziału Transportu i Elektrotechniki, Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu [7]. Obiektem badań były odcinki szyn z wadami squat wyjęte z toru kolejowego oraz ich wzorce schodkowe. Źródłem światła laserowego – nadajnika, jest dioda półprzewodnikowa, generująca ślad na szynie, a odbiornik kamera wizyjna. Przesuwane były one wzdłuż szyny za pomocą precyzyjnego napędu śrubowego z maksymalną rozdzielczością pomiaru 0,5 mm.

Do pomiaru zastosowano systemowe przyrządy firmy Agilent, które komunikują się z komputerem za pośrednictwem karty interfejsu GPIB (ang. *General Purpose Interface Bus*). Uzyskano 16 bitową rozdzielczość amplitudy sygnałów. Całością systemu steruje komputer z zaimplementowaną aplikacją pomiarową LASER, utworzoną w zintegrowanym graficznym środowisku programowym VEE Pro.

Wyznaczenie dwuwymiarowej funkcji korelacji

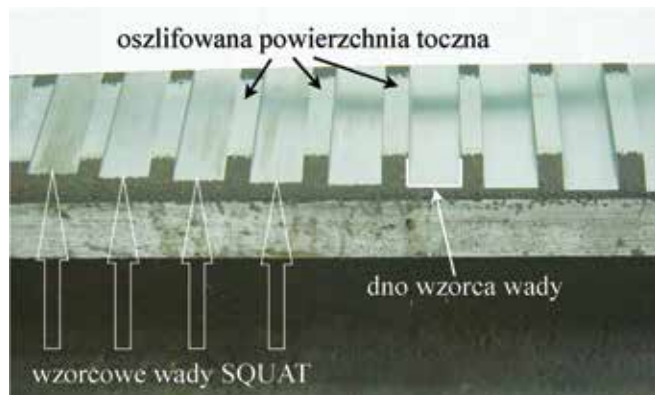
Istnieje niewiele funkcji dysponujących ścisłą transformacją Fouriera. Toteż, aby wykorzystać to narzędzie do analizy dowolnej funkcji, potrzeba pewnych założeń. Po pierwsze, badana funkcja jest cykliczna, tzn. jej próbki powtarzają się nieskończoną liczbę razy w dwu wymiarach. Po drugie, do analizy wybiera się tylko jeden okres zmienności. Wtedy równanie transformacji Fouriera przyjmuje postać [3]:



dla odpowiednich wzorców wad squat głębokość stopnia w mm S5 - $h_1 = 0.5$, S8 - $h_1 = 1.8$, S11 - $h_1 = 3.0$, a długości w mm $d_1 = 21.0$

dla wzorca wady squat S4 głębokości stopni w mm, $h_1 = 0.7$, $h_2 = 1.2$, a długości w mm $d_2 = 19.9$; $d_{13} = 21.4$

Rys. 1. Wzorce schodkowe wad squat – wymiary zarysów: a) pojedynczy, b) wielokrotny



Rys. 2. Wzorec wykonany na powierzchni tocznej główki szyny

$$F(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[2\pi i(xv_x + yv_y)] dx dy \quad (1)$$

i może być przedstawione w postaci dogodnej do obliczeń numerycznych dyskretnej transformacji Fouriera (DFT):

$$F(k, l) = \sum_{-N}^N \sum_{-M}^M f(n, m) \exp[2\pi i(n\Delta x k \Delta v_x + m\Delta y l \Delta v_y)] \quad (2)$$

gdzie: Δx , Δy oznaczają odległości między sąsiednimi punktami próbkowania w kierunku osi x i y , zaś Δv_x , Δv_y – odległości między punktami próbkowania w płaszczyźnie częstości przestrzennych.

W celu znacznego przyspieszenia obliczeń, można zastosować algorytm szybkiej transformaty Fouriera FFT (ang. *Fast Fourier Transform*) [3]. W tym celu zakłada się, że:

$$\Delta x = \frac{1}{2K \cdot \Delta v_x}; \quad \Delta y = \frac{1}{2L \cdot \Delta v_y} \quad (3)$$

$$\Delta v_x = \frac{1}{2N \cdot \Delta x}; \quad \Delta v_y = \frac{1}{2M \cdot \Delta y} \quad (4)$$

gdzie $(2N+1)$, $(2M+1)$ – liczba punktów próbkowania w płaszczyźnie obiektu, zaś $(2K+1)$, $(2L+1)$ – liczba punktów próbkowania w płaszczyźnie Fouriera.

Algorytm FFT wyznacza funkcję korelacji dwóch funkcji, a następnie przeprowadza jej transformację (lub wyznacza jej widmo). Funkcje korelacji lub autokorelacji znalazły istotne znaczenie w analizie obrazów.

W tym celu utworzono odpowiednie filtry Vander Lugta. Odfiltrowują one pewne częstości przestrzenne stosownie do obrazu wzorca, do którego porównywany jest obraz z wadą. Tworzenie takich filtrów jest procesem dość złożonym, bowiem trzeba na kliszy fotograficznej umieścić obrazy widm tych obrazów. W tym celu fotografuje się wadę materiałową, a jej trans-

formatę Fouriera umieszcza się tak, żeby widma obu obrazów znalazły się w tej samej płaskiej fali świetlnej. Następnie przepuszcza się przez widma obu obrazów światło będące falą płaską oraz przez układ optyczny dający odwrotną transformację Fouriera. Na wyjściu otrzymuje się m.in. funkcję korelacji funkcji filtrującej i filtrowanej. Proces ten opisano w [2].

Korelacja funkcji $f(x, y)$ i $g(x, y)$ zdefiniowana jest jako:

$$c(x, y) = f(x, y) \otimes g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(s, t) g^*(s-x, t-y) ds dt \quad (5)$$

Korelację łatwo można obliczyć, jeżeli weźmie się pod uwagę, że dla transformacji Fouriera obu stron równania (5) zachodzi związek:

$$C(v_x, v_y) = F(v_x, v_y) G^*(v_x, v_y) \quad (6)$$

gdzie: C , F oraz G są transformatami Fouriera funkcji c , f oraz g . W tej sytuacji widać, że łatwo obliczyć funkcję korelacji dwóch innych funkcji.

Jeśli funkcja g zawiera wzorec, który należy wyszukać w rozkładzie funkcji f , to funkcja korelacji pokaże „pik” w tym miejscu, gdzie on występuje [12]. W przypadku braku podobieństwa funkcja korelacji jest rozmyta i słabsza. „Pik” świadczy o tym, że częstości przestrzenne, które występują w obrazie wzorcowym są wzmacniane, a te których tam nie ma wyeliminowane.

Analiza wad typu squat

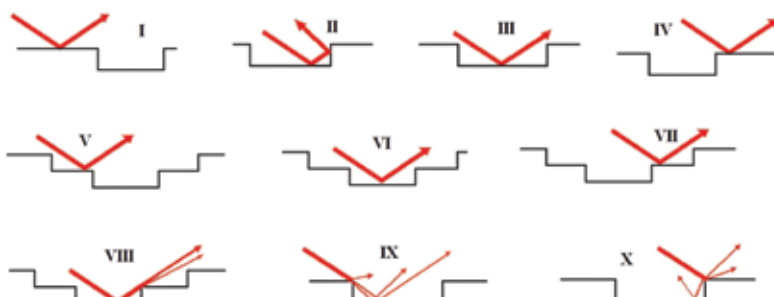
Obiekty badań

Do badań wykorzystano obrazy pozyskane na wzorcach schodkowych, oznaczonych symbolem S (od squat), o zarysach przedstawionych na rys. 1a i b oraz realnie wykonanych na powierzchni szyny (rys. 2). Symbolikę oznaczonych miejsc badań przyjęto zgodnie z notacją angielską.

Wybrane refleksy wiązki lasera, odbite od płaszczyzn i krawędzi wzorców wady squat, przyjmują kierunki jak na rys. 3, co jest typowe dla optyki geometrycznej [6]. W wyniku odbić i rozprożeń wiązki, odbiornik (kamera) rejestruje je w postaci amplitudy sygnału lub obrazu, co jest przedmiotem badań autorów.

Nietrudno zauważyć, że pewne powierzchnie (szczególnie pionowe) mogą być niewidoczne. Dlatego konieczna jest generacja wiązki lasera wzdłuż szyny w obu kierunkach. Ponadto w wąskich szczelinach pęknięć, jak wady *head checking*, światło lasera zanika.

Widok próbki rzeczywistych wad squat na powierzchni szyny wyjętej z toru kolejowego przedstawia rys. 4. Stanowi ona przykład reprezentatywny, prezentujący szeroką gamę kształtów



Rys. 3. Odbicia geometryczne wiązki lasera od płaszczyzn i krawędzi wzorców



Rys. 4. Wady rzeczywiste squat na powierzchni tocznej szyny

i głębokości wad. Ich powierzchnie swoją strukturą (chropowatością) odbiegają od powierzchni wzorców, a krawędzie z reguły są łagodne. Do oceny jej struktury autorzy zastosowali funkcję korelacji.

Linią poziomą naznaczono drogę skanowania plamką lasera. W rzeczywistych warunkach pomiarowych, można wykorzystać linijkę laserów o rozdzielczości zapewniającej pokrycie całego obszaru w poprzek główki szyny.

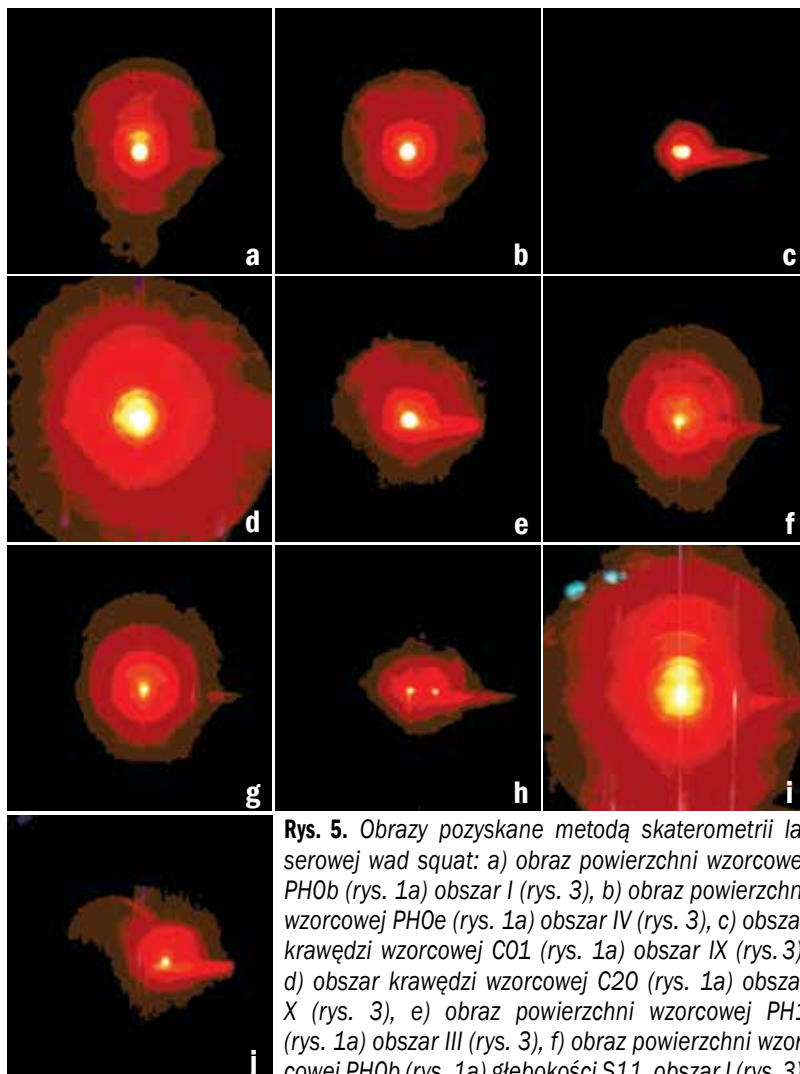
Przykłady zobrazowania korelacji wad

Na rys. 5 przedstawione zostały obrazy skaterometrii laserowej zarejestrowane dla wady przedstawionej na rys. 1a, a na rys. 6. dla wad zobrazowanych na rys. 1b. Podobnie na rys. 7 pokazano funkcje korelacji dla różnych kombinacji obrazów wad z rys. 5. Z kolei rys. 8 prezentuje funkcje korelacji dla różnych obrazów wad typu squat z rys. 6. Rys. 9 zawiera kilka przypadków obrazów skaterometrii, gdzie nie są znane badane obszary, czy krawędzie, a zadaniem funkcji korelacji jest rozpoznać co to za obszar. Poszczególne obrazy to efekt badań powierzchni z rys. 4, gdzie kolejny numer obrazu pokazuje, z którego miejsca rzeczywistej wady został pobrany. Rys. 10 to wybrane funkcje korelacji obrazów skaterometrii rzeczywistych wad squat z wybranymi obrazami wzorcowymi.

Ocena podobieństwa wad

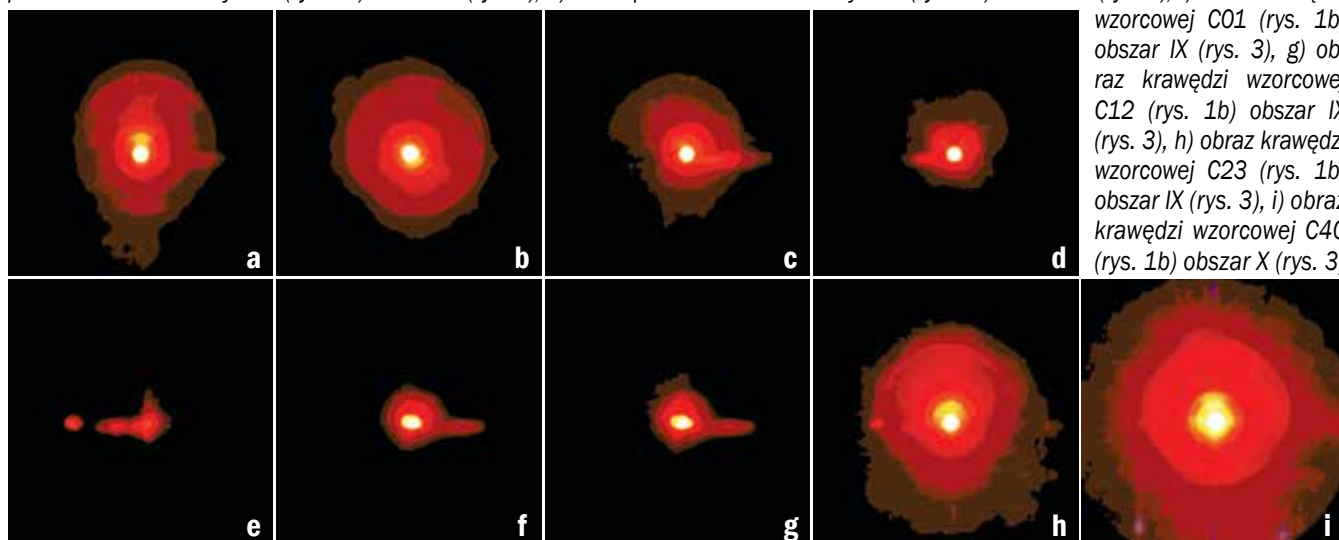
Funkcje korelacji wad mogą być mylące, ponieważ ważnym jest porównanie obrazu wzorca wady z obrazem nieznanym. Do porównywania obrazów wad można użyć funkcji korelacji w pewnym sensie „unormowanej” [11]:

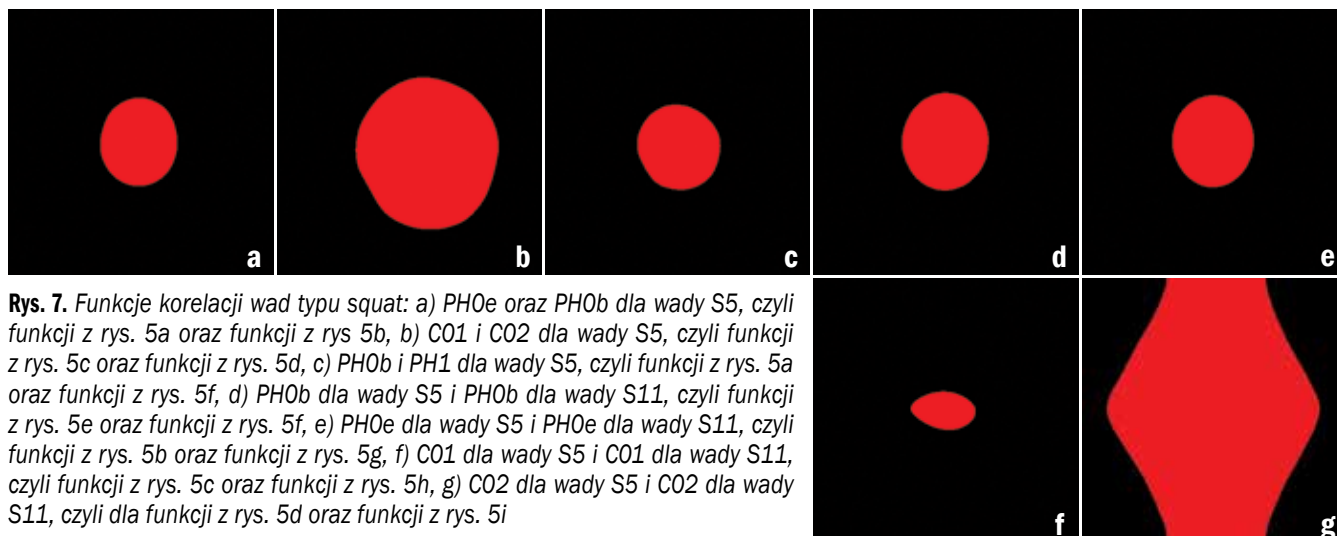
$$\tilde{c}(x, y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(s, t) g^*(s - x, t - y) ds dt}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |g(s, t)|^2 ds dt} \quad (7)$$



Rys. 5. Obrazy pozyskane metodą skaterometrii laserowej wad squat: a) obraz powierzchni wzorcowej PHOb (rys. 1a) obszar I (rys. 3), b) obraz powierzchni wzorcowej PH0e (rys. 1a) obszar IV (rys. 3), c) obszar krawędzi wzorcowej C01 (rys. 1a) obszar IX (rys. 3), d) obszar krawędzi wzorcowej C20 (rys. 1a) obszar X (rys. 3), e) obraz powierzchni wzorcowej PH1 (rys. 1a) obszar III (rys. 3), f) obraz powierzchni wzorcowej PHOb (rys. 1a) głębokości S11, obszar I (rys. 3), g) obraz powierzchni wzorcowej PH0e (rys. 1a) głębokości S11, obszar IV (rys. 3), h) obszar krawędzi wzorcowej C01 głębokości S11 (rys. 1a) obszar IX (rys. 3), i) obszar krawędzi wzorcowej C02, głębokości S11 (rys. 1a) obszar X (rys. 3), j) obszar powierzchni wzorcowej PH1 głębokości S11 (rys. 1a) obszar III (rys. 3)

Rys. 6. Obrazy pozyskane metodą skaterometrii laserowej wad squat: a) obraz powierzchni wzorcowej PHOb (rys. 1b) obszar I (rys. 3), b) obraz powierzchni wzorcowej PH0e (rys. 1b) obszar IV (rys. 3), c) obraz powierzchni wzorcowej PH1 (rys. 1b) obszar V (rys. 3), d) obraz powierzchni wzorcowej PH2 (rys. 1b) obszar VI (rys. 3), e) obraz powierzchni wzorcowej PH3 (rys. 1b) obszar VII (rys. 3), f) obraz krawędzi wzorcowej C01 (rys. 1b) obszar IX (rys. 3), g) obraz krawędzi wzorcowej C12 (rys. 1b) obszar IX (rys. 3), h) obraz krawędzi wzorcowej C23 (rys. 1b) obszar IX (rys. 3), i) obraz krawędzi wzorcowej C40 (rys. 1b) obszar X (rys. 3)





Rys. 7. Funkcje korelacji wad typu squat: a) PH0e oraz PH0b dla wady S5, czyli funkcji z rys. 5a oraz funkcji z rys. 5b, b) C01 i C02 dla wady S5, czyli funkcji z rys. 5c oraz funkcji z rys. 5d, c) PH0b i PH1 dla wady S5, czyli funkcji z rys. 5a oraz funkcji z rys. 5f, d) PH0b dla wady S5 i PH0b dla wady S11, czyli funkcji z rys. 5e oraz funkcji z rys. 5f, e) PH0e dla wady S5 i PH0e dla wady S11, czyli funkcji z rys. 5b oraz funkcji z rys. 5g, f) C01 dla wady S5 i C01 dla wady S11, czyli funkcji z rys. 5c oraz funkcji z rys. 5h, g) C02 dla wady S5 i C02 dla wady S11, czyli dla funkcji z rys. 5d oraz funkcji z rys. 5i

W tabeli 1 podano wartości unormowanych funkcji korelacji dla obrazów przedstawionych na rys. 7. Porównując wyniki w tej tabeli widać, że najmniej skorelowane są funkcje C01 i C20 dla głębokości S5, a najbardziej skorelowane są funkcje C20 dla głębokości S5 i C20 dla głębokości S11.

Tab. 1. Wartości korelacji dla funkcji przedstawionych na rys. 7

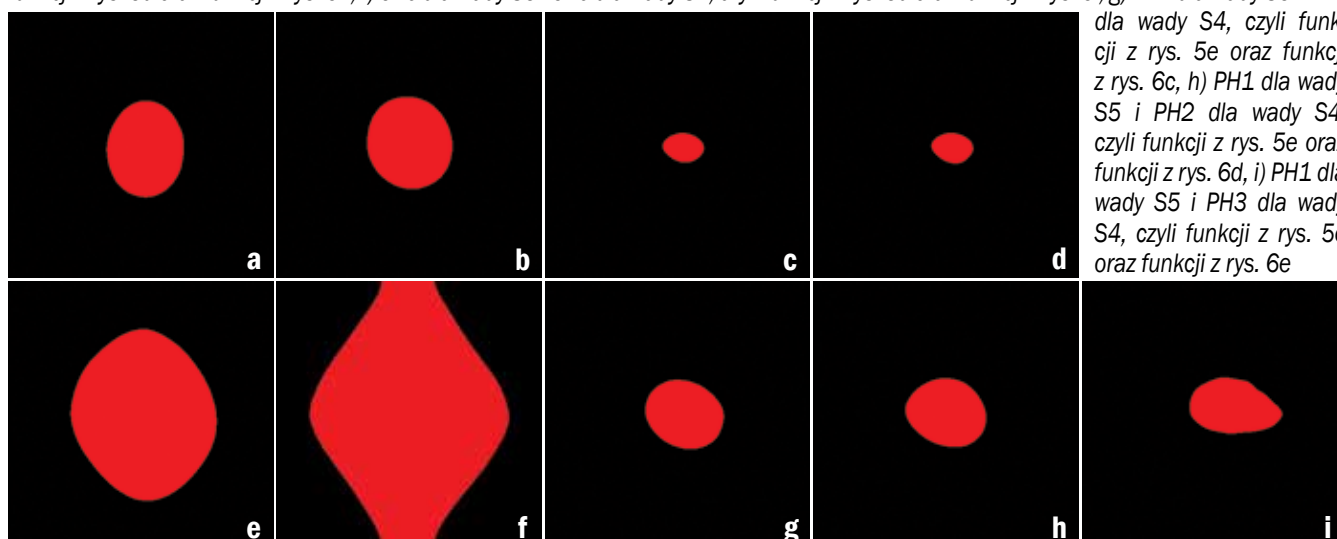
Korelacja funkcji	Wartość korelacji	Procentowe nakładanie się obrazów wad
PH0e i PH0b dla S5	0,1474	84,37%
C01 i C20 dla S5	0,0037	0,51%
PH0b i PH1 dla S5	0,1698	97,19%
PH0b dla S5 i PH0b dla S11	0,1505	70,92%
PH0e dla S5 i PH0e dla S11	0,1409	77,37%
C01 dla S5 i C01 dla S11	0,0275	31,87%
C20 dla S5 i C20 dla S11	0,6929	91,73%

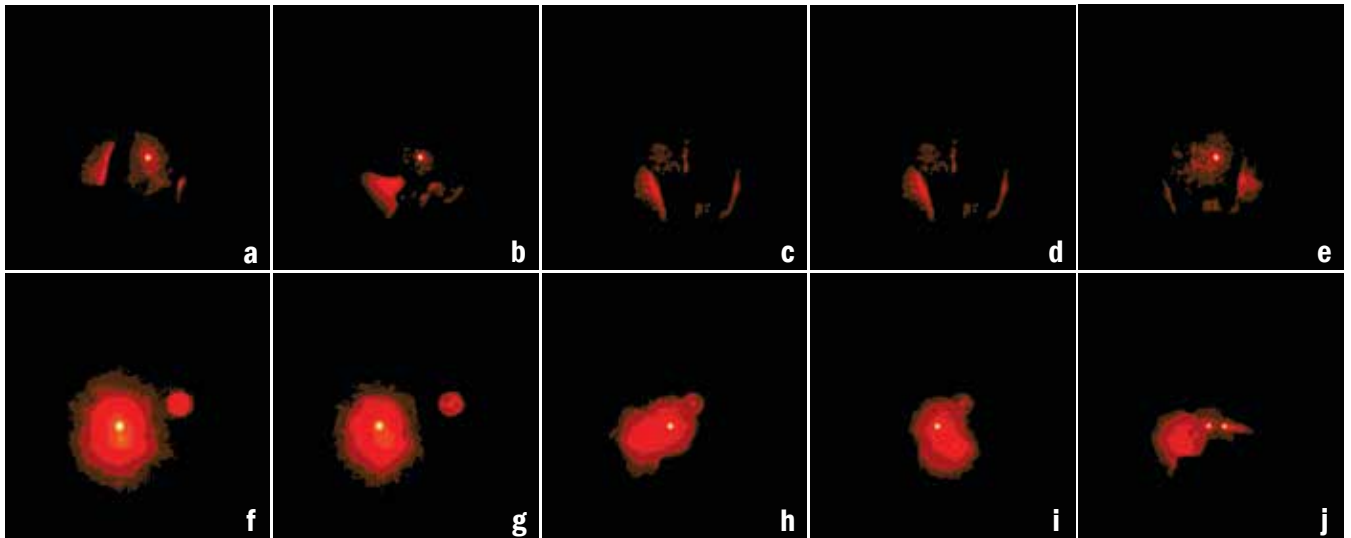
W tabeli 2 podano wartości unormowanych funkcji korelacji dla obrazów przedstawionych na rys. 8. Analizując wyniki w tabeli 2 widać, że najmniej skorelowane są funkcje PH1 dla głębokości S5 i PH3 dla głębokości S4, a najbardziej skorelowane są funkcje C20 dla głębokości S5 i C40 dla głębokości S4.

Tab. 2. Wartości korelacji dla funkcji przedstawionych na rys. 8

Korelacja funkcji	Wartość korelacji	Procentowe nakładanie się obrazów wad
PH0b dla S5 i PH0b dla S4	0,1671	94,51%
PH0e dla S5 i PH0e dla S4	0,1343	65,93%
C01 dla S5 i C01 dla S4	0,0419	90,30%
C01 dla S5 i C12 dla S4	0,0402	82,04%
C20 dla S5 i C23 dla S4	0,1783	24,61%
C20 dla S5 i C40 dla S4	0,6897	95,18%
PH1 dla S5 i PH1 dla S4	0,1046	64,41%
PH1 dla S5 i PH2 dla S4	0,0397	24,44%
PH1 dla S5 i PH3 dla S4	0,0044	2,71%

Rys. 8. Funkcje korelacji wad typu squat: a) PH0b dla wady typu S5 i PH0b dla wady typu S4, czyli funkcji z rys. 5a oraz funkcji z rys. 6a, b) PH0e dla wady typu S5 i PH0e dla wady typu S4, czyli funkcji z rys. 5b oraz funkcji z rys. 6b, c) C01 dla wady S5 i C01 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5c oraz funkcji z rys. 6f, d) C01 dla wady S5 i C12 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5c oraz funkcji z rys. 6g, e) C20 dla wady S5 i C23 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5d oraz funkcji z rys. 6h, f) C20 dla wady S5 i C40 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5d oraz funkcji z rys. 6i, g) PH1 dla wady S5 i PH1 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5e oraz funkcji z rys. 6c, h) PH1 dla wady S5 i PH2 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5e oraz funkcji z rys. 6d, i) PH1 dla wady S5 i PH3 dla wady S4, czyli funkcji z rys. 5e oraz funkcji z rys. 6e





Rys. 9. Obrazy skaterometrii rzeczywistych wad squat: a) numer 1 zlokalizowany jest jako 1 na rys. 4, b) 2 zlokalizowany jest jako 2 na rys. 4, c) 3 jako 3, d) 4 jako 4, e) 5 jako 5, f) 6 jako 6, g) 7 jako 7, h) 8 jako 8, i) 9 jako 9, j) 10 jako 10, k) 11 jako 11

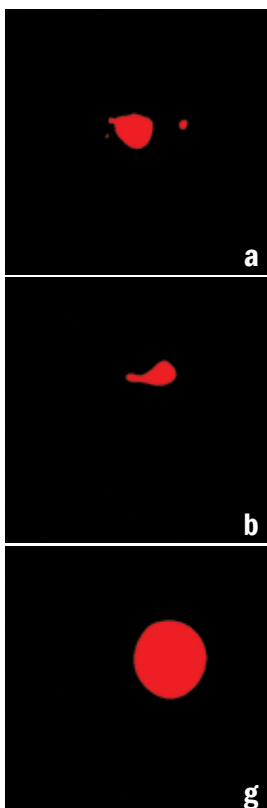
W tabeli 3 podano wartości nieznanych unormowanych funkcji korelacji przedstawionych na rys. 9. Wynika z nich, że najmniej są skorelowane funkcje C01 dla głębokości S11 i funkcja 4, a najbardziej skorelowane są funkcje PH0b dla głębokości C5 i funkcja 8.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że wartości korelacji dla funkcji rzeczywistych są skorelowane znacząco mniej niż w przypadku funkcji wzorcowych wad. Może to być spowodowane tym, że funkcje wzorcowe są dla wad „idealnych”, a np. wady rzeczywiste nie mają poziomych płaszczyzn, tak jak wady wzorcowe.

Poza tym wady wzorcowe zawierają płaszczyzny gładkie, zaś wady rzeczywiste nie mają takich powierzchni – mają pewną ziarnistość, są chropowate. Wady wzorcowe mają regularne kształty, zaś wady rzeczywiste – nieregularne.

Podsumowanie

W pracy została przedstawiona metoda porównywania obrazów uzyskanych metodą skaterometrii laserowej wad szyn ko-



Rys. 10. Funkcje korelacji wad typu squat: a) funkcja 1 (rys. 4) oraz funkcja z rys. 6e, b) funkcja 2 (rys. 4) oraz funkcja z rys. 6e, c) funkcja 3 (rys. 4) oraz funkcja z rys. 6e, d) funkcja 4 (rys. 4) oraz funkcja z rys. 5h, e) funkcja 5 (rys. 4) oraz funkcja z rys. 6e, f) funkcja 6 (rys. 4) oraz funkcja PH0e dla wady S11 (rys. 5g), g) funkcja 7 (rys. 4) oraz funkcja PH0e dla wady S11 (rys. 5g), h) funkcja 8 (rys. 4) oraz funkcja PH0b dla wady C5 (rys. 5a), i) funkcja 9 (rys. 4) oraz funkcja PH0b dla wady S4 (rys. 6a), j) funkcja 10 (rys. 4) oraz funkcja C01 dla wady S11 (rys. 6f), k) funkcja 11 (rys. 4) oraz funkcja C01 dla wady S11 (rys. 5h)

Tab. 3. Wartości korelacji dla funkcji przedstawionych na rys. 9

Korelacja funkcji	Wartość korelacji	Procentowe nakładanie się obrazów wad
PH3 dla S4 i funkcja 1	0,0157	63,82%
PH3 dla S4 i funkcja 2	0,0030	18,52%
PH3 dla S4 i funkcja 3	0,0038	25,85%
C01 dla S11 i funkcja 4	0,0003	0,35%
PH3 dla S4 i funkcja 5	0,0160	65,04%
PH0e dla S11 i funkcja 6	0,0748	41,08%
PH0e dla S11 i funkcja 7	0,1395	76,61%
PH0b dla C5 i funkcja 8	0,1689	96,68%
PH0b dla S4 i funkcja 9	0,0159	8,99%
C01 dla S11 i funkcja 10	0,0062	20,60%
C01 dla S11 i funkcja 11	0,0098	30,91%

lejowych typu squat z obrazami wzorcowymi. Metoda polega na wykorzystaniu transformacji Fouriera do szybkiego obliczenia funkcji korelacji obrazów pomiarowych wad. Zastosowany algorytm szybkiej transformacji FFT znacząco skrócił obliczenia tej funkcji.

Funkcja korelacji pozwoliła na ustalenie podobieństwa między badanymi funkcjami. Tam, gdzie występuje podobieństwo, w funkcji korelacji pojawia się „pik”. Im jest ten „pik” wyższy i o większej amplitudzie, tym podobieństwo jest większe.

Na rys. 7, 8 i 10 przedstawione zostały funkcje korelacji obliczone zgodnie ze wzorem (7). Korelacja między funkcjami wad wzorcowych jest duża i świadczy o podobieństwie niektórych funkcji wzorcowych.

Na rys. 10 pokazano funkcje korelacji między funkcjami wad wzorcowych a funkcjami wad rzeczywistych. Wyniki wskazują, że podobieństwa te są dużo mniejsze. Spowodowane to jest tym, że funkcje korelacji wad rzeczywistych mają nieco inny charakter, niż funkcje korelacji wad wzorcowych.

Według wiedzy autorów, badania przedstawione w artykule mają nowatorski charakter w skali światowej i stanowią przyczynek dalszych prac nad poprawą diagnostyki wad powierzchniowych szyn kolejowych. Można tu korzystać zarówno z przedstawionej metody skaterometrii laserowej, jak również z klasycznej metody wizyjnej.

Bibliografia:

1. Bracewell R., *The Fourier transform and its applications*, McGraw-Hill, Boston 2000.
2. Gniadek K., *Optyczne przetwarzanie informacji*, PWN, Warszawa 1992.
3. Izydorczyk J., Płonka G., Tyma G., *Teoria sygnałów*, Wydawnictwo Helion, 2006.
4. Lesiak P., Bojarczak P., Wlazło M., *Algorytmy przetwarzania sygnałów w defektoskopii optycznej powierzchniowych wad kontaktowo-naprężeniowych szyn kolejowych*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym” INFRASZYN 2014, Zakopane 9–11 kwietnia, ITE-PIB, Radom 2014.

5. Lesiak P., Bojarczak P., *Przetwarzanie i analiza obrazów w wybranych badaniach defektoskopowych*, Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji, ITE, Radom 2012.
6. Lesiak P., Szumiata T., Wlazło M., *Laser scatterometry for detection of squat defects in railway rails*, The Archives of Transport, Volume 33, Issue 1, pp. 47–56, Warszawa 2015.
7. Lesiak P., Szumiata T., *Skaterometria laserowa wad head checking w szynach kolejowych*, „Pomiary Automatyka Komputery w Gospodarce i Ochronie Środowiska”, 2010, nr 2.
8. Lesiak P., Wlazło M., *Badania i analiza widmowa sygnałów wad squat w defektoskopii optycznej szyn kolejowych*, „Logistyka” 2014, nr 3.
9. Lim J. S., *Two-dimensional signal and image processing*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall 1990.
10. Sokołowski A., *Nowy algorytm klasyfikacji obiektów na przykładzie bazy P522144 zawierającej opisy zmian melanocytowych skóry*, Oprogramowanie Naukowo-Techniczne, Kraków 2005.
11. Sokołowski A., *Fourier transform in machine learning process*, Artificial Intelligence and Soft Computing, Academic Publishing House EXIT, Warszawa 2006.
12. Szymczyk T., *Metoda dopasowania wzorców w rozpoznawaniu obrazów – ograniczenia, problemy i modyfikacje metody*, Automatyka, 12, No 2, 449, 2008.
13. Xianyu Su, Wenjing Chen, *Fourier transform profilometry: an review*. Opt and Lasers in Eng., 35, No 5, 263, 2001.

Autorzy:

dr hab. inż. **Piotr Lesiak**, prof. nadzw. UTH – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. K. Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, p.lesiak@uthrad.pl

dr **Aleksander Sokołowski**, Politechnika Rzeszowska w Rzeszowie, Wydział Zarządzania, Zakład Informatyki w Zarządzaniu, alex5@prz.edu.pl

mgr inż. **Marek Wlazło**, doktorant Wydziału Transportu i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny i. K. Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, firma Sunnco Kolektory Słoneczne, sunnco@sunnco.pl

Two-dimensional cross-correlation function of the flaws type of squat in diagnostics of railway rails by laser scatterometry method

Two-dimensional cross-correlation function has been applied to evaluate similarity of railway rails flaws images, that were obtaining by means of laser scatterometry method. These images arise from the dispersion of laser beam. The contact-tension flaws squat type have been chosen as property research. Proposed method consists in comparison between flaws images and standard images. Two-dimensional Fast Fourier Transform has been applied to calculate cross-correlation functions for these images. Fourier transforms both images were multiplied. Next the inverse Fourier transform was calculated and as the result cross-correlation function was obtained. Characteristic similarity effect of both images is the image with sharp expressive peak. The numerical value of this function is a measure of the similarity flaws image and standard image. This original algorithm sets new possibilities in railway rails diagnosis.