

Krzysztof Gądek

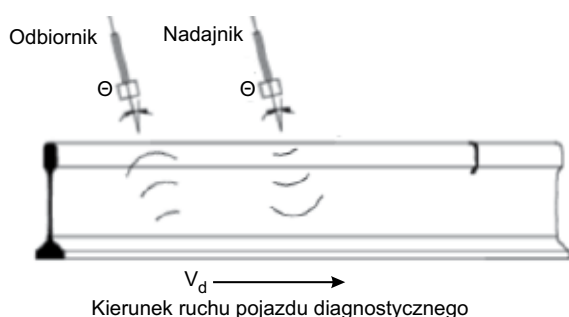
Ultradźwiękowa metoda wykrywania uszkodzeń szyn, wykorzystująca kodowanie fazy sygnału diagnostycznego

W diagnostyce szyn kolejowych powszechnie stosowane są obecnie metody ultradźwiękowe oraz metody indukcyjne, wykorzystujące indukcje magnetyczną w celu wykrycia zmian pola magnetycznego w otoczeniu szyny, powodowanych obecnością nieciągłości geometrycznych, takich jak pęknięcia. Konwencjonalne badanie ultradźwiękowe wykorzystują koła [3] lub sanie [2] wypełnione wodą, wyposażone w szereg czujników piezoelektrycznych. Czujniki ultradźwiękowe są umieszczone pionowo (rys. 1) ponad główką szyny, pracują w trybie impulsowym skan B (ang. B-scan) [7] w celu detekcji wad poziomych oraz pod kątem $\theta = 70^\circ$ do normalnej do powierzchni jezdnej w celu detekcji wad poprzecznych.

Wymienione metody mają szereg niedogodności wynikających z warunków płaszczyzny kontaktowej, ograniczających szybkość i obszar pokrycia kontroli. Warunki kontaktowe są wrażliwe na zmiany środowiskowe, takie jak wahania temperatury, które mogą wpływać na wydajność testu. Najbardziej krytyczną wadą metody ultradźwiękowej jest jej nieskuteczność w przypadku obecności płytkich pęknięć poziomych powłok w pobliżu powierzchni głowki szyny. Pęknięcia takie ograniczają możliwości penetracji wiązki ultradźwiękowej, a przez to ograniczają możliwości wykrycia poważnych wewnętrznych wad. Dodatkowo wadami ultradźwiękowej kontroli są: ograniczenie prędkości diagnostycznej (zwykle mniej niż 7 m/s) oraz ograniczona skuteczność w wykrywaniu pionowych pęknięć głowki szyny [8].

Spośród urządzeń omówionych w literaturze [2, 3, 8–11] na uwagę zasługuje prototypowe urządzenie [2] wykorzystujące laserowe wymuszenie, wykazujące się lepszą skutecznością i umożliwiające zwiększenie prędkości diagnostycznej do 18 m/s.

Ultradźwiękowe metody stosujące wymuszenie impulsowe [2, 5] posiadają ograniczenia wynikające z sekwencji cykli wymuszenia i nasłuchiwanie echa. Czas trwania wymuszenia ogranicza energię fali ultradźwiękowej, co z kolei prowadzi do ograniczenia możliwości penetracji wiązki. W celu ograniczenia zakłóceń kolejny sygnał wymuszenia powinien pojawiać się nie wcześniej niż zostaną wytłumione odbicia poprzedniego sygnału wymuszenia. Powyższe ograniczenia wyznaczają rozdzielczość skanu B, co prowadzi do granicznej prędkości diagnostycznej [1]. Prezentowana poniżej autorska metoda umożliwia zwiększenie energii wiązki ultradźwiękowej poprzez wymuszenie zmodulowaną fazowo falą ultradźwiękową oraz zwiększenie rozdzielczości skanu B badanego ośrodka, a przez to zwiększenie prędkości diagnostycznej.



Rys. 1. Diagnostyka ultradźwiękowa szyny kolejowej

Metoda diagnostyczna z kodowaniem sygnału wymuszenia

Użyta w autorskiej metodzie cyfrowa modulacja sygnału wymuszenia umożliwia analizę sygnału powracającego z rozdzielczością zegara sygnału modulującego. Fala nośna zmodulowana fazowo $f_w(t)$ opisana jest równaniem (1):

$$f_w(t) = A_m \cdot \cos(2\pi \cdot f_n \cdot t + k \cdot KCM(t)) \quad (1)$$

Sygnał wymuszenia zmodulowany jest fazowo ciągiem binarnym $KCM(t)$. Sekwencja modulującego kodu binarnego KCM generowana jest w układzie pseudolosowego generatora, rejestru przesuwającego z liniowym sprzężeniem zwrotnym LFSR (ang. Linear Feedback Shift Register), opisanego wielomianem kodującym (2):

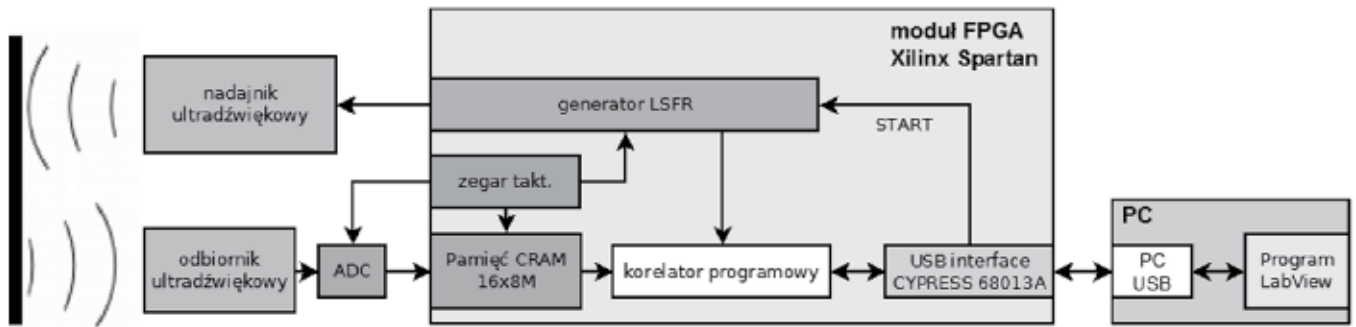
$$W(x) = x^6 + x^4 + 1 \quad (2)$$

Modulacja fazy nie wpływa na amplitudę sygnału fali nośnej, a ze względu na symetryczny rozkład zer i jedynek kodu KCM częstotliwość fali nośnej nie ulega przesunięciu [6]. Jest to ważne ze względu na wąskie pasmo przetwornika fali ultradźwiękowej – aby możliwe było odtworzenie maksimum danych transmitowanego sygnału, pasma częstotliwości modulowanych sygnałów muszą pokrywać się z pasmem przetwarzania przetworników ultradźwiękowych [4]. Dobór odpowiednich współczynników wielomianu (2) kodującego $W(x)$ jest konieczny – umożliwia maksymalne odtworzenie sekwencji kodu modulującego w odbiorniku. Optymalizacja wielomianu $W(x)$ została przeprowadzona na podstawie powyższych założeń, za pomocą przyjętego kryterium jakości sygnału pomiarowego, określonego jako stosunek wartości maksymalnego pików korelacji do wartości średniej sygnału Φ_{gh} :

$$k(1) = \frac{\Phi_{gh}(m_1)}{\frac{1}{L} \cdot \sum_{n=0}^{L-1} (g(n) \cdot h^*(n-m))} \quad (3)$$

Przyjęte kryterium (3) pozwoliło wyznaczyć optymalne współczynniki wielomianu ($W = b01010001$), głębokość modulacji fazy oraz określić skuteczność przyjętych założeń w badanym zakresie pomiarowym.

Metoda korelacyjna opisana w artykule opiera się na analizie sygnału odbitego i skorelowanie jego parametrów ze zmodulowanym sygnałem wzbudzenia. W celu ilustracji uszkodzeń badanej szyny przeprowadzona została korelacja skośna sygnału



Rys. 2. Schemat blokowy aplikacji pomiarowej
Źródło: oprac. własne

wymuszenia $f_w(t)$ z sygnałem odbitym odtworzonym w odbiorniku. Dla sygnałów $g(t)$ i $h(t)$ o ograniczonej energii funkcja korelacji wzajemnej jest określona wzorem:

$$\phi_{gh}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(t) \cdot h(t + \tau) dt \quad (4)$$

gdzie:

$g^*(t)$ – zespolona funkcja sprzężona do $g(t)$,
 $g(t)$ – sygnał odpowiedzi na wymuszenie $h(t)$.

Dla sygnałów dyskretnych g_n i h_n , przesuniętych względem siebie o całkowitą liczbę próbek m , dyskretna postać funkcji korelacji wzajemnej – wyznaczona z równania (4) – ma postać:

$$\phi_{gh}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n) \cdot h^*(n - m) \quad (5)$$

W obszarach uszkodzeń występuje niejednorodność materiału, która powoduje odbicia fali ultradźwiękowej, które z kolei powodują większe wartości funkcji korelacji dla obszarów uszkodzonych. Wykorzystując technikę skan B oraz (5), wyznaczono wyrażenie (6):

$$M(x, y) = \sum_{n=0}^L g(n + x) \cdot h^*(n + x - y) \quad (6)$$

$$\Delta X = \frac{V_d L}{f_p} x \quad (7)$$

$$\Delta Y = \frac{V_u}{f_p} y \quad (8)$$

gdzie:

L – długość analizowanego ciągu wynikająca z maksymalnej głębokości skanowania,

x – całkowita zmienna identyfikująca rozdzielczość obrazowania w osi X wzdłuż szyny,

y – całkowita zmienna identyfikująca rozdzielczość obrazowania w osi Y normalnej do powierzchni jezdnej szyny,

f_p – częstotliwość próbkowania sygnału odbitego,

V_d – prędkość diagnostyczna wzdłuż badanego obiektu,

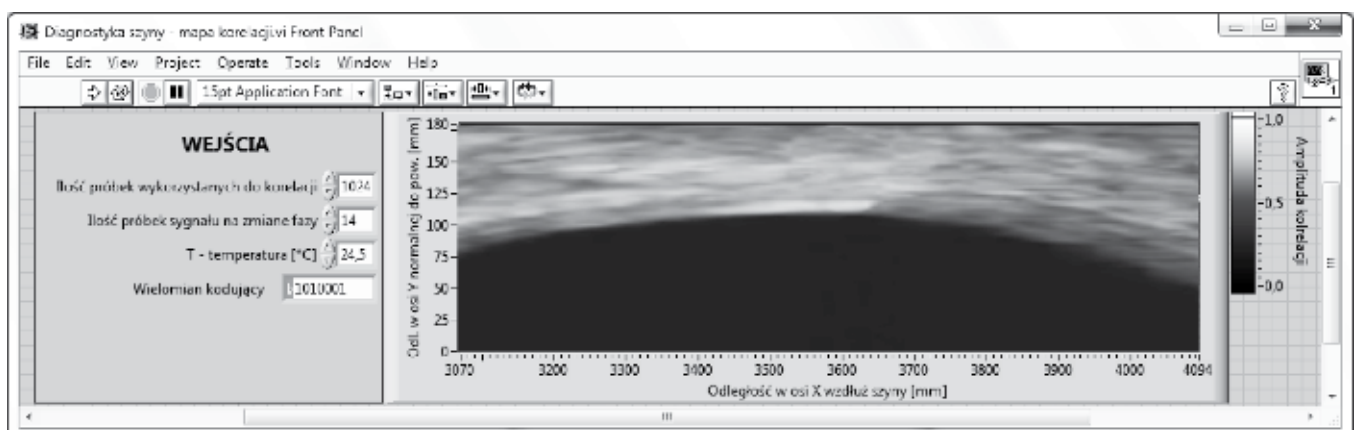
V_u – prędkość fali ultradźwiękowej w badanym ośrodku.

Równania (6), (7) i (8) umożliwiają wykreślenie 3-wymiarowego wykresu odzwierciedlającego jednorodność badanego obiektu.

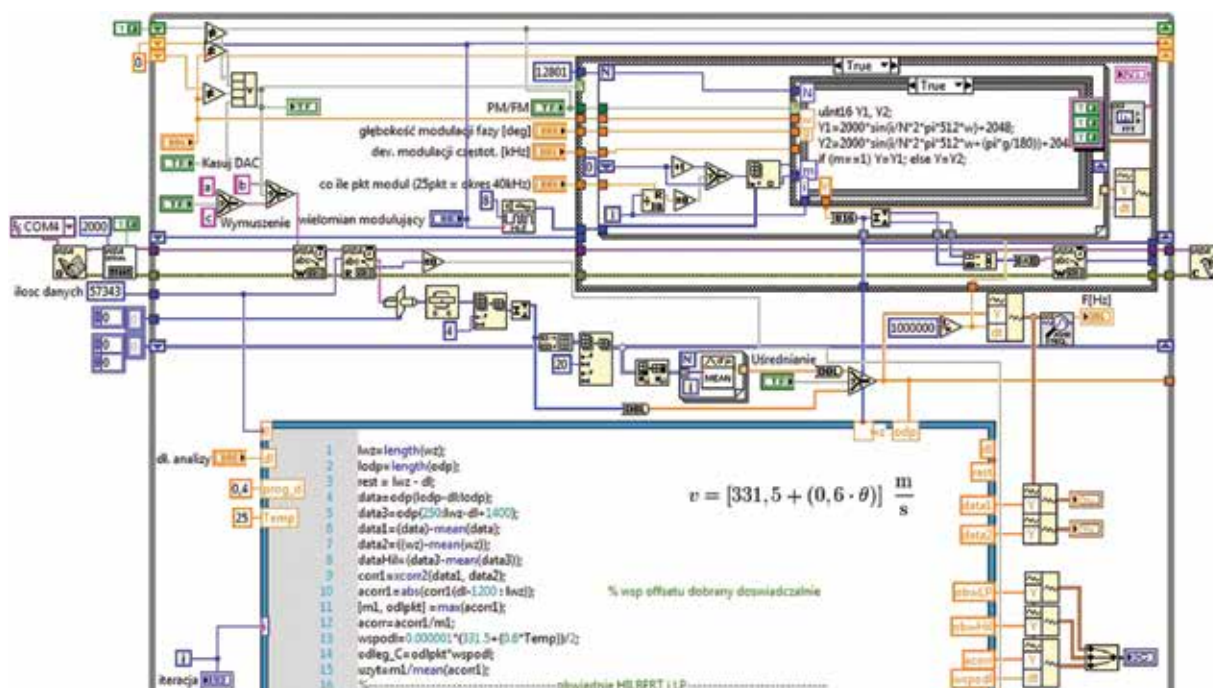
Aplikacja układu pomiarowego

W celu przeprowadzenia eksperymentu pomiarowego, potwierdzającego przydatność metody do diagnostyki stanu szyn kolejowych, przeprowadzono szereg testów laboratoryjnych, wykorzystujących prototypowy układ pomiarowy. Schemat blokowy ilustrujący algorytm pracy cyfrowego modulatora i programowego korelatora, zaimplementowanego w prototypowym urządzeniu, prezentuje rys. 2.

Zastosowany moduł FPGA z układem Spartan firmy Xilinx wykorzystano zarówno do generowania i modulacji fazy fali nośnej, jak i do obsługi programowego korelatora sygnałów wymuszenia i odbitego, realizującego obliczenia algorytmu (6). Wyliczone dane $M(x,y)$ zostają przesłane do komputera PC w celu wizualizacji wyników, jak i archiwizacji. Na bazie przyjętych założeń przetestowano powyższą metodę przy pomocy autorskiego programu napisanego w środowisku LabVIEW (rys. 3).



Rys. 3. Skan B przeprowadzony w trakcie eksperymentu pomiarowego
Źródło: oprac. własne



Rys. 4. Fragment autorskiego programu wykonanego w programie LabView, wykorzystywanego do identyfikacji uszkodzeń

W trakcie laboratoryjnego eksperymentu pomiarowego przeprowadzono szereg skanów typu B na obiektach testowych. Przykładowy test zaprezentowano na rysunku 3, potwierdzający przydatność metody korelacyjnej do defektoskopii ultradźwiękowej.

Ograniczenia algorytmu

Z uwagi na czas trwania obliczeń korelacji skośnej konieczne jest wyznaczenie pomiarowej prędkości granicznej dla zadanej rozdzielczości pomiaru. Wyznaczono zależność (9) określającą maksymalną prędkość diagnostyczną V_d na podstawie czasu t_a trwania obliczeń jednej iteracji korelacji skośnej w module FPGA.

$$t_a < \frac{\Delta X}{V_d} \quad (9)$$

Wyznaczono parametry systemu obliczeniowego FPGA spełniającego założenia projektowe na podstawie zależności (9). Dla przyjętej rozdzielczości skanowania 0,002 m i prędkości diagnostycznej lepszej niż 20 m/s czas iteracji korelacji w układzie FPGA musi być krótszy niż 0,1 ms. Warunek ten implikuje konieczność zastosowania szybkich układów FPGA o dużej pojemności, wykonujących obliczenia równoległe dla każdego iloczynu (5) korelacji.

Podsumowanie

Eksperyment wykazał, że autorska metoda wykorzystująca kodowanie fazy może zostać z powodzeniem wykorzystana do diagnostyki szyn kolejowych. Przy zastosowaniu szybkich układów FPGA, realizujących obliczenia równoległe, pozwoliła uzyskać większą rozdzielczość pomiarową oraz szybszą prędkość diagnostyczną. Prezentowana metoda jest innowacyjna i wymaga dalszych badań w warunkach rzeczywistych. W perspektywie dalszych badań zakłada się wyznaczenie optymalnego kąta θ padania wiązki w funkcji prędkości przemieszczania się obiektu pomiarowego oraz wyznaczenie optymalnej liczby bloków korelacji zaimplementowanych w strukturze FPGA, niezbędnych do realizacji pomiarów w czasie rzeczywistym.

Bibliografia:

1. Algernon D., Ernst H., *Signal Processing for Air-Coupled Impact-Echo using Microphone Arrays*, 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban 2012.
2. Bartoli I., Lanza di Scalea F., *Modeling guided wave propagation with application to the long-range defect detection in railroad tracks*, „NDT&E International” 2005, No. 38.
3. Brizuela J., Fritsch C., Ibáñez A., *Railway wheel-flat detection and measurement by ultrasound*, „Transportation Research Part C: Emerging Technologies” 2011, No. 19.
4. Gądek K., Dudzik M., *Optymalizacja parametrów modulatora w ultradźwiękowym układzie do pomiaru odległości metoda korelacyjną*, „Pomiary Automatyka Kontrola” 2013, nr 10 (59).
5. Hesse D., *Rail inspection using ultrasonic surface waves*, Imperial Department of Mechanical Engineering Imperial College London, London 2007.
6. Laurent P. A., *Exact and Approximate Construction of Digital Phase Modulations by Superposition of Amplitude Modulated Pulses*, „IEEE Transactions on Communications” 1986, No. 2(34).
7. Mix P. E., *Introduction to Nondestructive Testing. A Training Guide*, ed. II, Wiley-Interscience, New Jersey 2005.
8. *On-Line High-Speed Rail Defect Detection Part II*, U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, Office of Railroad Policy and Development Washington, 2012.
9. Rose J. L., Avioli M. J., *Application and potential of guided wave rail inspection*, „Insight” 2002, No. 6 (44).
10. Ryue J., Thompson D. J., *Wave reflection and transmission due to defects in infinite structural waveguides at high frequencies*, „Journal of Sound and Vibration” 2011, No. 330.
11. Zumpano G., Meo M., *A new damage detection technique based on wave propagation for rails*, „International Journal of Solids and Structures” 2006, No. 43.

Autor:

dr inż. **Krzysztof Gądek** – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej