

Małgorzata Banach, Ewa Krawczyk, Krzysztof Schabowicz*, Adam Sterniuk

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej

Komputerowa analiza wyników otrzymanych z tomografu ultradźwiękowego

Computer analysis of received results from an ultrasound tomograph

ABSTRACT

This paper presents employment of modern computer methods used to analyze the results obtained during the exploration of concrete elements with an ultrasound tomograph. The results are presented in the form of graphical maps and depiction of the signal course function. The results are burdened with various, errors – noises, distortion of the image. Verification of results requires extensive knowledge, experience in the field of construction diagnostics, and also an ability to combine both: construction and computer methods. Therefore mathematical methods and computer programs become helpful. The perfect transformation for reconstruction and analysis of results seems to be wavelet analysis, which eliminates the weakness of the Fourier transform, which does not included the complete set of information while analysis is carried out.

Keywords: *ultrasound tomography; non-destructive testing; wavelet analysis; computer methods*

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wykorzystanie współczesnych metod komputerowych stosowanych do analizy wyników otrzymanych podczas badania elementów betonowych tomografem ultradźwiękowym. Rezultaty prezentowane są w postaci map graficznych oraz zobrazowań funkcji przebiegu sygnałów. Otrzymane rezultaty są obciążone różnymi błędami – szumy, dystrorsje obrazu. Weryfikacja wyników wymaga dużej wiedzy, doświadczenia w zakresie diagnostyki konstrukcji, a także umiejętności łączenia wiedzy z dziedziny budownictwa i metod obliczeniowych. Pomocne stają się wtedy metody matematyczne oraz programy komputerowe, umożliwiające ich zaimplementowanie. Idealnym przekształceniem służącym do rekonstrukcji i analizy rezultatów wydaje się być analiza falkowa. Niweluje ona słabość transformaty Fouriera, która nie zachowuje podczas analizy kompletności informacji.

Słowa kluczowe: *tomografia ultradźwiękowa; badania nieniszczące; analiza falkowa; metody komputerowe*

1. Wprowadzenie

W procesie badania niezawodności konstrukcji powszechnie stosowane są metody nieniszczące, które umożliwiają detekcję ewentualnych nieciągłości i ukrytych wad, a także wtrąceń, np. niewłaściwie rozmieszczonych prętów zbrojeniowych. Jedną z dostępnych metod dla takich badań jest tomografia ultradźwiękowa. Rezultatem badania są wyniki w postaci zobrazowań oraz funkcje sygnału. Istnieje wiele prac opisujących możliwości tej metody, takie jak określanie grubości elementów [1], dobieranie parametrów podczas prowadzonego badania [2], [3] czy wykrywanie wad znajdujących się na różnej głębokości [4]. Poza pracami na temat samej metody dostępne są również pozycje opisujące rekonstrukcję obrazów uzyskanych podczas badania [5]-[9], choć jest ich niewiele.

Analiza i interpretacja wyników otrzymanych podczas badań nieniszczących powiązana jest ściśle z doświadczeniem, wiedzą, a także techniką i metodami ich prowadzenia. Podstawowe algorytmy rekonstrukcji i analizy obrazu oparte są na transformacie Fouriera, transformacie Rodona, twierdzeniu rzutu Fouriera, metodzie projekcji wstecznej lub transformacie Cromacka. Istnieją również metody algebraiczne i statystyczne, które są pomocne przy rekonstrukcji. Są to przykładowo metoda iteracyjna lub metoda największego prawdopodobieństwa.

Ciekawą i mało rozpoznaną w tego typu badaniach jest

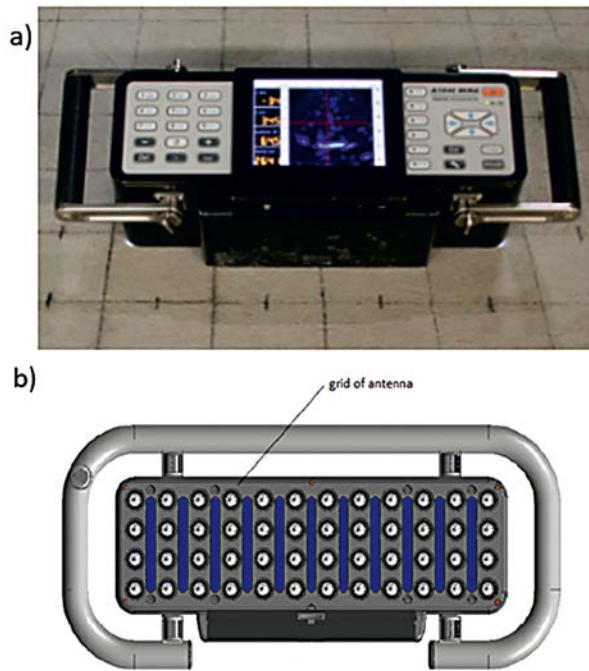
metoda transformaty falkowej. Tematyka ta jest mało przeanalizowana i rozpowszechniona, a jednocześnie, jak wykazują pilotażowe badania, bardzo skuteczna. Praca, która najszerzej opisuje zastosowanie teorii falek w diagnostyce jest publikacja [10], w której prezentowane są także podstawy teorii falek. Przedstawione jest tam również zastosowanie falek w aplikacjach o charakterze inżynierskim, związanych z przetwarzaniem sygnałów. Innymi publikacjami na temat teorii falek są [11] i [12]. Przedstawiają one podstawy tej teorii oraz skuteczność jej stosowania w analizach obrazów.

1.1 Aparatura badawcza

Do przeprowadzenia badania, na potrzeby pracy, wykorzystano tomograf ultradźwiękowy A1040 MIRA (Rys. 1). Opis tego urządzenia można odnaleźć między innymi w artykule [13]. Sposób działania tomografu przedstawiono w publikacji [14]. Urządzenie to stosowane jest do badań obiektów, które są wykonane z betonu, betonu zbrojonego lub kamienia. Podczas badania wykorzystuje się metodę pomiaru przysłony Ramana, w której badany jest „nacisk” fali ultradźwiękowej w każdym punkcie półprzestrzeni.

Dane zbierane są w tablicy, która jest tworzona w wyniku zbierania par informacji, pochodzących z nadajnika i odbiornika. Każde zobrazowanie otrzymane podczas badania jest rezultatem analizy fal poprzecznych, które są wysyłane i odbierane przez macierz czterdziestu ośmiu głowic (Rys. 1b).

*Autor korespondencyjny. E-mail: krzysztof.schabowicz@pwr.edu.pl



Rys. 1. Tomograf ultradźwiękowy A1040 MIRA: a) widok od góry, b) widok od spodu, źródło: [14]

Fig. 1. Ultrasound tomograph A1040 MIRA: a) top view, b) bottom view, source: [14]

1.2 Rodzaje plików otrzymanych z przeprowadzonego badania

Podstawowym wynikiem uzyskanym podczas badania tomografem ultradźwiękowym próbek betonowych, jest zobrazowanie w postaci mapy bitowej. Podczas eksperymentu wykorzystywany jest trójwymiarowy układ współrzędnych kartezjański. Punkt zerowy układu przyjmowany jest adekwatnie do aktualnego położenia urządzenia. Oś Y jest to oś skierowana zgodnie z dłuższym wymiarem tomografu. Zwrot tej osi skierowany jest od strony lewej do prawej. Oś Z zlokalizowana jest w głąb urządzenia, prostopadle do płaszczyzny XY. Po przeprowadzeniu badania otrzymuje się trzy prostopadłe skany:

- B-skan – cięcie płaszczyzną prostopadłą do osi X;
- C-skan – cięcie płaszczyzną prostopadłą do osi Z;
- D-skan – cięcie płaszczyzną prostopadłą do osi Y.

Sterowanie urządzeniem podczas badania odbywa się zawsze według wcześniej założonej siatki podziału, wynikającej z przyjętego układu odniesienia.

2. Analiza falkowa

Falki są to rodziny funkcji określone na zbiorze liczb rzeczywistych. Każda z tych funkcji dąży do zera dla argumentu dążącego do nieskończoności oraz charakteryzuje się zerową wartością średnią. Falka powstaje poprzez przekształcenie tak zwanej falki matki, czyli funkcji macierzystej. Ponadto funkcje te różnią się od zera wyłącznie na małym odcinku, co pozwala na przybliżenie nimi praktycznie każdego sygnału z dowolną dokładnością poprzez tworzenie odpowiednich kombinacji. Dopasowanie do rozważanego sygnału odbywa się poprzez odpowiednie przesunięcie i skalowanie, co odzwierciedla wzór (1). We wzorze (1) stała a^{-2} służy do

normalizacji falki.

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

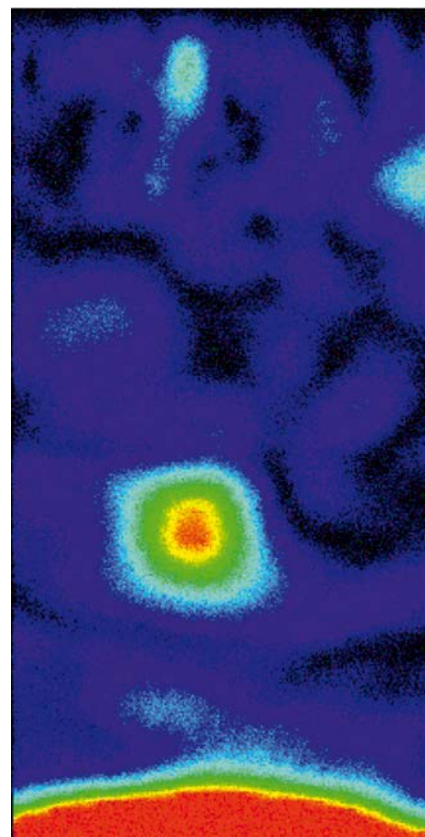
gdzie:

- a – parametr skali, współczynnik kompresji
- b – parametr przesunięcia (translacji)

2.1 Usuwanie szumu z grafiki przy zastosowaniu falek

Na obrazowaniach otrzymanych z badania tomografem ultradźwiękowym pojawiają się losowe wtrącenia, różniące się od rzeczywistego obrazu jasnością bądź kolorem, co jest powszechnie znanym zjawiskiem nazywanym potocznie szumem, co pokazano na rysunku 2. Oznacza to, że pozbycie się szumu ułatwi interpretację kształtu wtrącenia, a także dokładniejsze określenie jego wymiarów.

W pracy wykonano odzsumienie w trzech etapach. W pierwszym wykonano transformatę falkową do ostatniego poziomu rozdzielczości. W tym celu użyto falek Coiflets. Tego rodzaju faleki używa się do eliminacji nieliniowego przesunięcia fazowego między sygnałem wejściowym, a wyjściowym. W kolejnym etapie zastosowano metodę progową na współczynnikach transformaty. Do algorytmu wybrano metodę progową Smooth Garrote. W końcowym etapie wykonano odwrotną transformatę falkową.



Rys. 2. Zaszumione zobrazowanie

Fig. 2. Noisy illustration

2.2 Zastosowanie analizy falkowej w analizie obrazu – dekompozycja falkowa Mallata

Dyskretna analiza falkowa prowadzi do wyznaczenia współczynników falkowych sygnału, zwanych inaczej

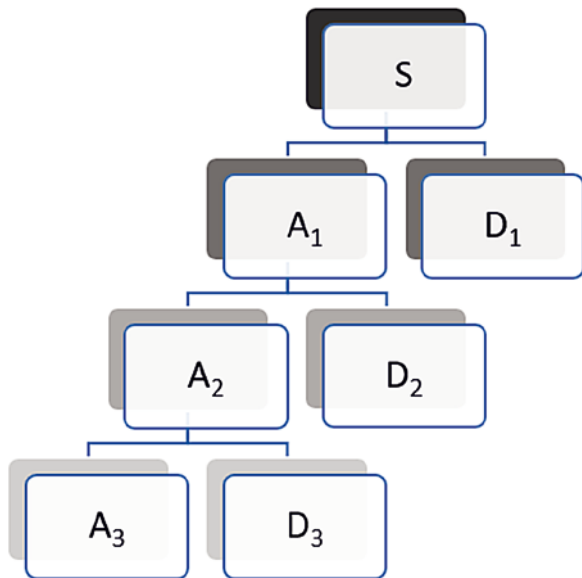
dyskretnymi transformatami falkowymi. W istocie są to iloczynny skalarne sygnału wejściowego $f(t)$ i ciągu funkcji podstawowych Ψ_{mn} , co przedstawia wzór (2).

$$\Psi_{mn}(t) = a_0^{-m} \Psi(a^{-m}t - nb_0)_{(m,n)} \in Z^2 \quad (2)$$

Przekształcenie dyskretne falki wyraża się wzorem (3).

$$DWT = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi(a^{-m}t - nb_0) dt \quad (3)$$

Aby możliwe było przetworzenie sygnału wejściowego na składowe należy wykorzystać analizę wielorozdzielczościową postaci (3). Dokonuje się w ten sposób dekompozycji na wielu poziomach rozdzielczości. Proces dekompozycji sygnału sprowadza się do wielopoziomowej iteracji, w wyniku której uzyskuje się kolejno po dwie składowe sygnału wejściowego. Jedną z nich nazywa się wielkoczęstotliwościową, czyli detałem D_j , natomiast drugą mało częstotliwościową, czyli aproksymacją A_j . Proces ten przedstawiono na rysunku 3, gdzie S oznacza sygnał wyjściowy, A_i aproksymaty (niskoczęstotliwościowe reprezentacje sygnału), a D_i detale (wysokoczęstotliwościowe reprezentacje sygnału).



Rys. 3. Drzewo dekompozycji
Fig. 3. Decomposition tree

Jak widać wejściowy sygnał S został podzielony na dwa sygnały A_i i D_i , które zawierają dwukrotnie mniejszą liczbę próbek. Możliwe jest jednak zastosowanie algorytmu wstecznego i bezstratne odtworzenie obrazu. Przekształcenie obrazu O w reprezentację falkową jest opisane równaniem (4):

$$\Psi_{mn}(t) = a_0^{-m} \Psi(a^{-m}t - nb_0)_{(m,n)} \in Z^2 \quad (4)$$

Rekonstrukcja obrazu O jest otrzymywana z równania odwrotnego (5).

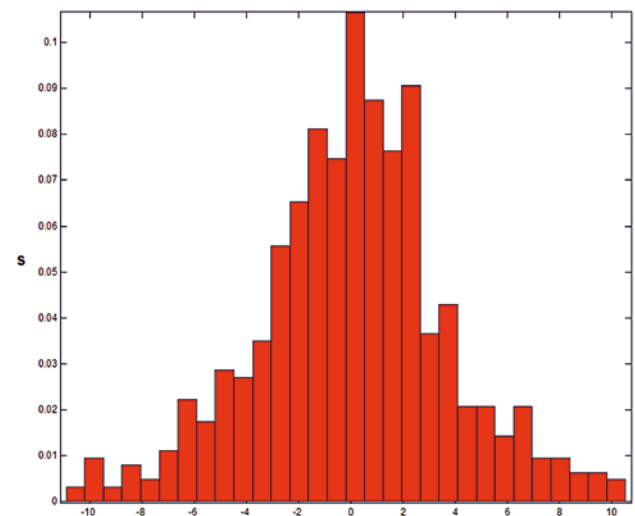
$$F = HOH^T \quad (5)$$

W matematycznym sensie dekompozycja polega na filtrowaniu dolno- oraz górnoprzepustowym, raz wzdłuż kolumn, raz wzdłuż wierszy obrazu, przy jednoczesnym dwukrotnym

zmniejszaniu rozdzielczości. Równanie transformacji można zapisać macierzowo, używając falki *Haara*.

2.3 Histogramy

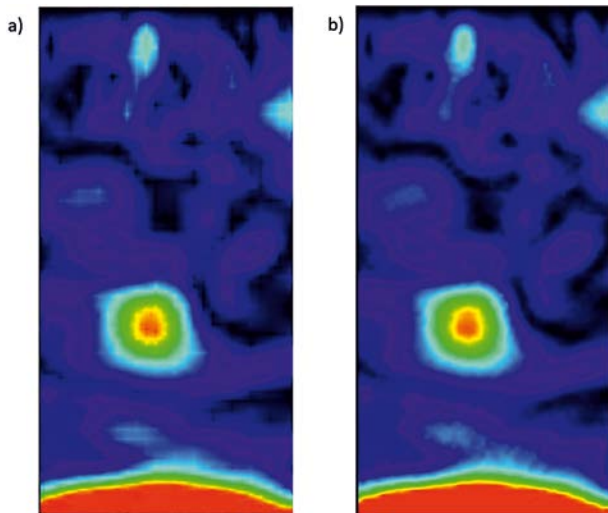
Za pomocą metod komputerowych, a dokładniej analizy obrazu binarnego można otrzymać histogramy sygnałów, co przykładowo pokazano na rysunku 4. Histogram jest to graficzne odwzorowanie jasności, intensywności danego piksela, które jest określone dokładnie w miejscu jego położenia. Można w ten sposób przedstawić skany otrzymane z tomografu ultradźwiękowego. W ten prosty sposób otrzymuje się lokalizację miejsc nieciągłości, które charakteryzują się największym odbiciem fali. Jest to jednoznaczne z faktem, że miejsca te osiągną na histogramie największe wartości, gdyż obraz tam jest najjaśniejszy.



Rys. 4. Histogram wyznaczony na podstawie B-scanu otrzymanego podczas badania tomografem
Fig. 4. Histogram determined on the basis of B-scan obtain during the tomograph scan

3. Przykłady zastosowania opracowanej komputerowej metody interpretowania obrazów i sygnałów otrzymanych podczas badania tomografem ultradźwiękowym

W ramach eksperymentu przygotowano elementy betonowe o wymiarach 500 x 1000 x 1000 mm. Układ współrzędnych przyjęty był podczas badania w górnym, lewym rogu. Pierwszym etapem eksperymentu było ponumerowanie elementów. Ścianka, na której widniał numer uważana była za przednią (front). Następnie naniesiono na elemencie siatkę podziału. Bok siatki miał wymiary 100 x 100 mm. Kolejno przeprowadzono badanie tomografem ultradźwiękowym. Do badania użyto tomografu ultradźwiękowego MIRA A1040. Prędkość fali ustalono doświadczalnie i wynosiła ona 2600 m/s. Celem badania była identyfikacja wtrąceń zabetonowanych w próbce, a dokładniej określenie rodzaju, kształtu i położenia elementów znajdujących się wewnątrz betonowej próbki. Każda próbka została przebadana w płaszczyznach równoległej i prostopadłej do ściany frontowej. Z każdym kolejnym pomiarem tomograf został przesunięty o odległość jednego boku siatki.



Rys. 5. Zobrazowanie otrzymane: a) podczas badania, b) po usunięciu szumu z grafiki

Fig. 5. Image received: a) during the test, b) after removal of the noise from the graphic

Na rysunku 5a pokazano przykładowe zobrazowanie otrzymane podczas badania jednej z próbek betonowych, a na rysunku 5b to samo zobrazowanie po przeprowadzeniu odszumiania według algorytmu przedstawionego w punkcie 2.1.

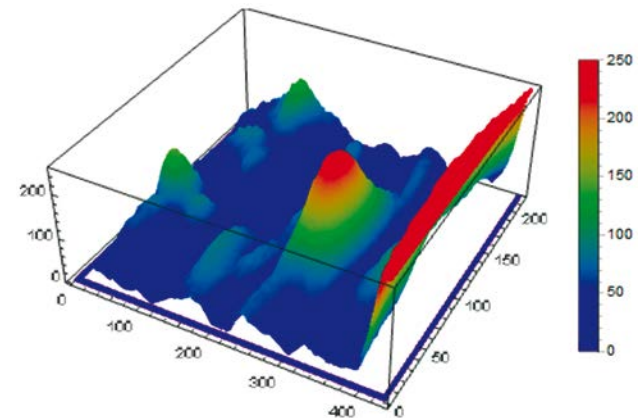
W celu wykonania jak najlepszej analizy wyników najpierw przeprowadzono rozpoznanie współczynników falkowych, aby jak najlepiej dobrać falkę bazową. Przeprowadzono analizę w programie Matlab, która miała na celu wyznaczenie współczynników korelacji. Wartość współczynnika korelacji jest tym większa im lepiej dobrana została falka bazowa.

Tab. 1. Współczynniki korelacji dla wybranych falek
Tab. 1. Correlation coefficients for selected wavelets

Falka	Współczynnik korelacji
Haar	0,9401
db2	0,9800
db3	0,9707
db4	0,9630
sym3	0,9707
sym4	0,9609
sym5	0,9624
cofi3	0,9872
cofi2	0,9836
bifor2	0,9827
bifor3	0,9679
bifor4	0,9609
rbio2	0,9706
dmey3	0,9737
dmey4	0,9710

Jak widać z tabeli 1 najlepszym dopasowaniem charakteryzuje się falka Coiflet. Następnie dokonano dekompozycji obrazów w celu określenia dokładnych wymiarów i kształtu przekroju zabetonowanego elementu. Dekompozycję przeprowadzono zgodnie z algorytmem opisanym w punkcie 2.2. Po analizie otrzymanych

wyników, dla każdego zobrazowania otrzymanego podczas badania próbki, można stwierdzić, że zabetonowany element miał kształt rury okrągłej o średnicy około 30mm. Kształt ten jest niemal widoczny gołym okiem. Interpretacja jego nie byłaby jednak taka prosta, gdyby był bardziej złożony. Wtedy analiza obrazu po dekompozycji dałaby bardziej spektakularny rezultat. Badana próbka miała wymiary 500x1000x1000 mm. Aby upewnić się co do głębokości na jakiej była położona rura stworzono histogram 3D, pokazany na rysunku 6.



Rys. 6. Histogram trójwymiarowy zobrazowania otrzymanego z tomografu ultradźwiękowego

Fig. 6. Three-dimensional histogram of the images obtained from the ultrasound tomograph

Analizowane zobrazowanie dotyczyło obszaru próbki pomiędzy 600 mm a 800 mm licząc od górnego lewego rogu. Jak widać na histogramie największe odbicie nastąpiło 100 mm od początku badanego zakresu. Można więc stwierdzić, że badany element znajdował się 700 mm od prawego brzegu próbki. Po podobnej analizie dotyczącej położenia wertykalnego stwierdzono, że element znajduje się na głębokości 300 mm. Wnioski zweryfikowano ze zdjęciami wykonanymi podczas betonowania próbek, co przykładowo przedstawiono na rysunku 7. Po weryfikacji stwierdzono, że zarówno oszacowane położenie elementu, jak i jego kształt oraz charakterystyka geometryczna zostały poprawnie określone. Wyniki są bardzo dobrym odwzwornianiem rzeczywistości.



Rys. 7. Widok elementu podczas betonowania
Fig. 7. View of the element during concreting

4. Wnioski

Badania nieniszczące, a w szczególności metoda tomografii ultradźwiękowej są przydatne zarówno w aspekcie wykrywania ewentualnych wtrąceń, nieciągłości czy defektów, jak i do sprawdzania niezawodności konstrukcji. Żeby jednak było to możliwe trzeba przeprowadzić badania zgodnie z instrukcjami i normami oraz posiadaną wiedzę techniczną, a następnie należy odpowiednio przeanalizować otrzymane rezultaty badań.

Istnieje wiele funkcji i przekształceń matematycznych, które umożliwiają analizę obrazów otrzymanych podczas badania tomografem ultradźwiękowym. Pozwalają one uzyskać dokładniejsze wyniki, wydobyć informacje na pierwszy rzut oka niewidoczne. Jednym z takich przekształceń jest analiza falkowa, która umożliwia analizowanie zarówno sygnałów jak i obrazów. Pozwala ona na poznanie bogatego zbioru funkcji bazowych, które jako całość tworzą sygnał. Jest to doskonale przekształcenie do eksponowania miejsc zaburzeń, które w przypadku badania próbek betonowych mogą oznaczać występowanie defektów w postaci pęknięć lub wtrąceń, w tym prętów zbrojeniowych.

W artykule przedstawiono podstawowe przekształcenia falkowe służące do dokładniejszego poznania wnętrza elementów betonowych. Przedstawione algorytmy często prowadzą do wyników przedstawionych w postaci graficznej, co jest łatwiejsze do interpretacji przez ludzkie oko. Możliwe jest wtedy nie tylko dostrzeżenie miejsc ewentualnego zaburzenia, ale również określenie jego położenie. Poza tym analiza falkowa pomaga w diagnozowaniu szerokiego zakresu sygnału. Jedną z największych zalet tego przekształcenia jest wielostopniowość rozkładu. Oznacza to, że ułatwia poznanie bardzo bogatego zbioru funkcji bazowych, które w całości tworzą sygnał wyjściowy.

Jak widać połączenie badań nieniszczących, szczególnie tomografii ultradźwiękowej z metodami komputerowymi daje możliwość szerszej analizy wyników otrzymanych podczas eksperymentu.

5. Literatura/References

- [1] Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., „Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echomethod”, *Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, 1997
- [2] Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., „Ultrasonictomography of metal structure using digital focused antenna arraymethods”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011
- [3] Samokrutov A.A., Kozlov V.N., Shevaldykin V.G., „Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities”, *The 5th International Conference on Non Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry, Moskwa*, 2006
- [4] Bishko A., „Improvement of imaging at small depths for acoustic tomography of reinforced concrete objects”, *The 6th International Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry, Mashinostroenie, Moskwa* 2007
- [5] Schickert M., Krause M., „Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete – structures”, *Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, 2010
- [6] Schickert M., „Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete”, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil engineering*, 1995
- [7] Śliwowski M., „Zmechanizowane systemy ultradźwiękowe do lokalizacji korozji wżerowej”, *XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane*, 2008
- [8] Jian-Hua T., Chin-Lung Ch., Chung-Yue W., Shua-Tao L., „Influence of Rebars on Elastic - Wave Based SAFT Image for Detecting Void in Concrete Structure”, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin*, 2015
- [9] Bazulin E.G., „Determining the Flaw Type from Images Obtained by the C-SAFT Method with Account for Transformations of Wave Types upon Reflections of Ultrasonic Pulses from Irregular Boundaries of a Test Object”, *Russian Journal of Nondestructive Testing, Moskwa*, 2010
- [10] Batko W., Ziółko M.: „Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej”, *Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie*, 2002
- [11] Chui C.K.: „An Introduction to Wavelets. Academic”, *Press, London* 1992
- [12] Daubechies I.: „Ten Lectures on Wavelets”, *SIAM, Philadelphia* 1992
- [13] De la Hoza A.O., Petersen C.G., Samokrutov A., „Three dimensional imaging of concrete structures using ultrasonic shear waves”
- [14] Oficjalna strona producenta aparatu A1040 MIRA <http://www.acsys.ru/>