Budownictwo i Architektura 12(1) (2013) 243-250

Diagnostyka zginanej płyty betonowej z zastosowaniem fal ultradźwiękowych modulowanych drganiami niskich częstotliwości

Błażej Meronk[1], Krzysztof Wilde[1]

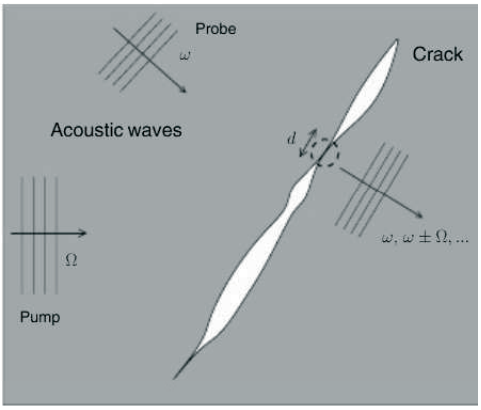
[1] *Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e–mail: blazej.meronk@wilis.pg.gda.pl, krzysztof.wilde@wilis.pg.gda.pl*

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest eksperymentalnej weryfikacji możliwości zastosowania modulacji diagnostycznej fali ultradźwiękowej drganiami niskich częstotliwości. Metoda jest zastosowana do wykrywania stref uszkodzenia płyty betonowej i bazuje na efektach nieliniowych wynikających z otwierania się rys. Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie wniosku, że badana metoda umożliwia wykrywanie stref zarysowanych wraz z oszacowaniem ich rozmiaru. Efektywność proponowanej metody jest lepsza niż standardowe badanie z zastosowaniem betonoskopu lub metody młoteczkowej (impact echo)

Słowa kluczowe: diagnostyka ultradźwiękowa, elementy betonowe, badania eksperymentalne

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie zjawiska akustyki nieliniowej, a w szczególności inter-modulacji fal sprężystych jest często opisywane jako metoda wykrywania uszkodzeń elementów konstrukcji. Zjawisko to polega na modulacji amplitudy i częstotliwości fali ultradźwiękowej propagującej przez materiał o nieliniowych własnościach sprężystych przez inną silną falę lub drgania o niższej częstotliwości.



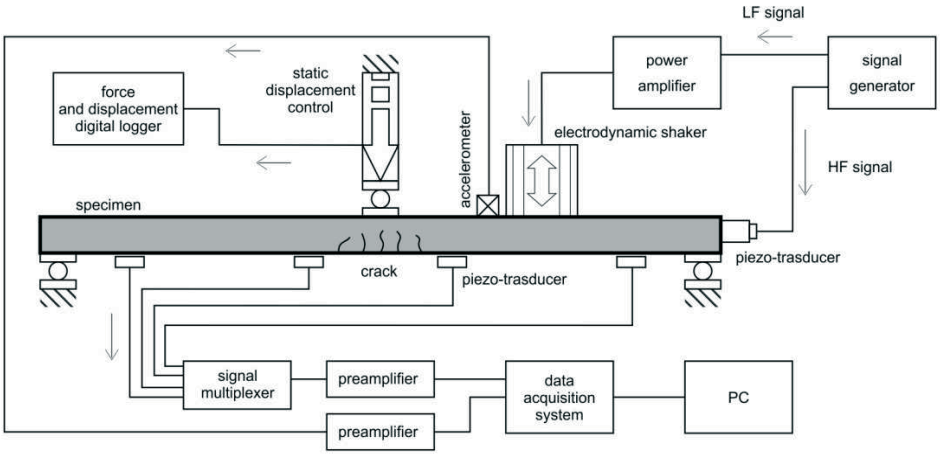
Rys. 1. Ilustracja zjawiska intermodulacji fal sprężystych [5]

Występuje silna analogia do zjawiska Luxemburg–Gorky (rys. 1), które zostało odkryte dla fal radiowych przechodzących przez jonosferę lub plazmę[1]. Słaba fala wysokiej częstotliwości, zwana falą nośną, jest modulowana przez silną falę o niższej częstotliwości, zwaną falą pompującą. Odbiornik, fali nośnej będzie rejestrował zniekształcenia będące efektem modulacji. Podobieństwa zjawisk zachodzących pomiędzy falami radiowymi, a falami sprężystymi są na tyle duże, że inter-modulację fal sprężystych, bywa również nazywana efektem Luxemburg–Gorky.

Głównym założeniem, pozwalającym wykorzystywać akustykę nieliniową do oceny stanu technicznego elementów konstrukcji jest związek pomiędzy stopniem nieliniowości stałych sprężystych w funkcji odkształcenia, a wielkością uszkodzeń w badanych próbkach [2]. Zakłada się, że materiał zdrowy, bez defektów ma liniową charakterystykę naprężenia – odkształcenia, w przypadku stali i aluminium [3], lub prawie liniową, w zakresie małych odkształceń w przypadku betonu [4]. Dlatego efekty nieliniowej akustyki w nieuszkodzonych elementach nie zachodzą, co pozwala łatwo je identyfikować w badaniach eksperymentalnych. Inaczej zachowują się elementy uszkodzone. Pęknięcia, na przykład rysy zmęczeniowe w płytach metalowych, mogą przenosić tylko naprężenia ściskające, przy rozciąganiu rysa otwiera się i nie przenosi sił. W przypadku wprowadzenia takiej konstrukcji w drgania rysa na przemian zamyka się i otwiera. Zamknięta rysa przewodzi falę ultradźwiękową, a nie zamknięta tą samą falę odbija. Rejestrowana fala zmienia swoją amplitudę cyklicznie, zgodnie z częstotliwością drgań (fali pompującej).

2. Opis stanowiska badawczego

Badania eksperymentalne przeprowadzono na próbkach żelbetowych, poddawanych jednoczesnemu działaniu obciążenia statycznego i dynamicznego przy jednoczesnej, periodycznej transmisji i detekcji fal ultradźwiękowych. Stanowisko składa się z następujących elementów: ramy wsporczej, próbki żelbetowej, aparatury do wymuszania obciążeń statycznych, aparatury do wymuszania obciążeń dynamicznych, układu do generacji i rejestracji fali ultradźwiękowej (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

Aparatura do wymuszania obciążeń statycznych składa się z następujących elementów: ramy ze śrubą dociskową, czujnika siły, czujnika przemieszczeń i rejestratora cyfrowego. Rama ze śrubą dociskową służy do przykładania siły statycznej w dowolnym punkcie belki żelbetowej. Wielkość wymuszenia jest regulowana ręcznie. Tensometryczny czujnik siły mierzy umieszczony jest pomiędzy próbką a śrubą dociskową. Możliwy jest pomiar siły od zera do 10kN. Elektrooptyczny inkrementalny czujnik przemieszczenia o dokładności 5um służy do pomiaru ugięcia belki pod obciążeniem. Zarówno czujnik siły, jak i czujnik przemieszczenia połączone są z rejestratorem cyfrowym, który zapisuje odczyty w zadanym interwale czasowym.

Aparatura do wymuszania obciążeń dynamicznych składa się z elektromagnetycznego wzbudnika drgań i akcelerometru. Elektromagnetyczny wzbudnik ma masę drgającą m = 0,31[kg], zawieszoną na układzie sprężyn płaskich o łącznej sztywności k = 11802,42[N/m]. Tłumienie układu jest bliskie tłumieniu krytycznemu. Masa jest poruszana napędem elektromagnetycznym o współczynniku siły BL = 17,01[N/A].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

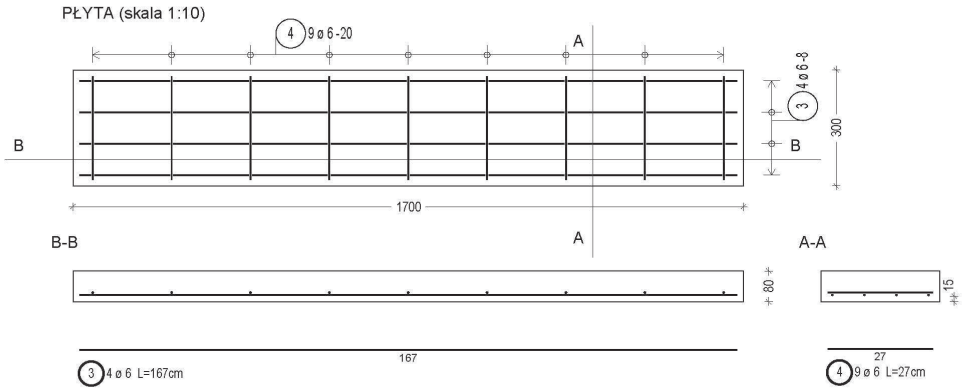
Wzbudnik zasilany jest wzmacniaczem o prądzie maksymalnym 5[A]. Sygnał sterujący pochodzi z generatora funkcyjnego. Urządzenie pozwala wprowadzać próbkę w drgania o częstotliwości od 5 do 100 [Hz]. Amplituda drgań próbki jest kontrolowana za pomocą akcelerometru piezoelektrycznego podłączonego do tego samego systemu akwizycji danych co układ rejestracji fal ultradźwiękowych. Takie połączenie umożliwia obserwację korelacji pomiędzy modulacją fal ultradźwiękowych, a drganiami próbki.

Układ generacji i rejestracji fal ultradźwiękowych skład a się dwóch niezależnych systemów. Urządzenia generujące i rejestrujące zostały rozdzielone by uniemożliwić zakłócenia przy rejestracji fali. Przy takiej konfiguracji, gdzie generator i rejestrator nie są połączone galwanicznie, można być pewnym, że zarejestrowany sygnał o częstotliwości nośnej obrazuje intensywność fali ultradźwiękowej, a nie jest jedynie zakłóceniem wynikającym z przesłuchu pomiędzy urządzeniami. Fala ultradźwiękowa generowana jest za pomocą zmodyfikowanej sondy betonoskopu, skonstruowanej tak by najwyższą skuteczność uzyskać przy częstotliwości 58[kH]. Fala o tej częstotliwości jest wzbudzana w sposób ciągły. Detekcja fali realizowana jest sekwencyjnie w czterech punktach rozłożonych za pomocą płytkowych elementów piezoelektrycznych. Następnie sygnał jest wzmacniany, filtrowany analogowo i rejestrowany systemem akwizycji danych z częstotliwością 2000000 próbek na sekundę.

Rys. 3. Zdjęcie stanowiska badawczego

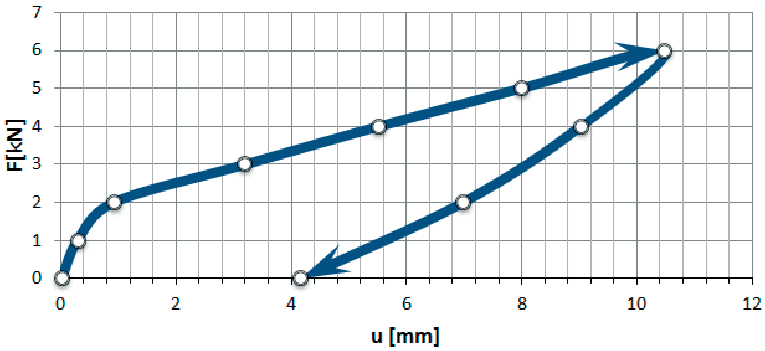
Wszystkie badania przeprowadzono na identycznych próbkach żelbetowych (rys. 4). Próbki mają wymiary: długości 1700mm, szerokości 300mm i wysokość 80mm. Wykonane są z betonu klasy C20/25. Zbrojenie stanowią cztery pręty średnicy 6mm ze stali AIII-N, umieszczone przy dolnej płaszczyźnie próbki, na otuleniu 20mm. Wykonano 12 sztuk. W celu uzyskania jak najmniejszych różnic pomiędzy dwunastoma próbkami wykonano je w zakładzie prefabrykacji wszystkie jednocześnie z tej samej mieszanki betonowej, we wspólnej formie podzielonej na dwanaście segmentów. Dlatego jest pewne, że proces zagęszczania i dojrzewania mieszanki przebiegał dokładnie tak samo dla wszystkich próbek.

Testy wykonane zostały dla próbek w różnym stadium uszkodzenia. Za każdym razem stosowano kilka ustalonych częstotliwości wymuszenia drgań, zmieniano też moc wzbudnika. Rejestrację sygnału wykonywano w czterech punktach na długości belki. Zbadane zostały próbki nieuszkodzone, a następnie próbki, które uszkodzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej (rys. 5), a także wykonywano testy na belkach w trakcie przykładania obciążenia, w czasie tworzenia i rozwoju rys oraz w trakcie odciążenia. Rys. 6 przedstawia przykładowy cykl obciążenia i odciążenia z zaznaczonymi punktami, w których wykonywano serie testów ultradźwiękowych.



Rys. 4. Szkic zbrojenia badanej płyty żelbetowej

Rys. 5. Próbka żelbetowa w trakcie próby niszczącej



Rys. 6. Wynik analizy sygnału w dziedzinie częstotliwości

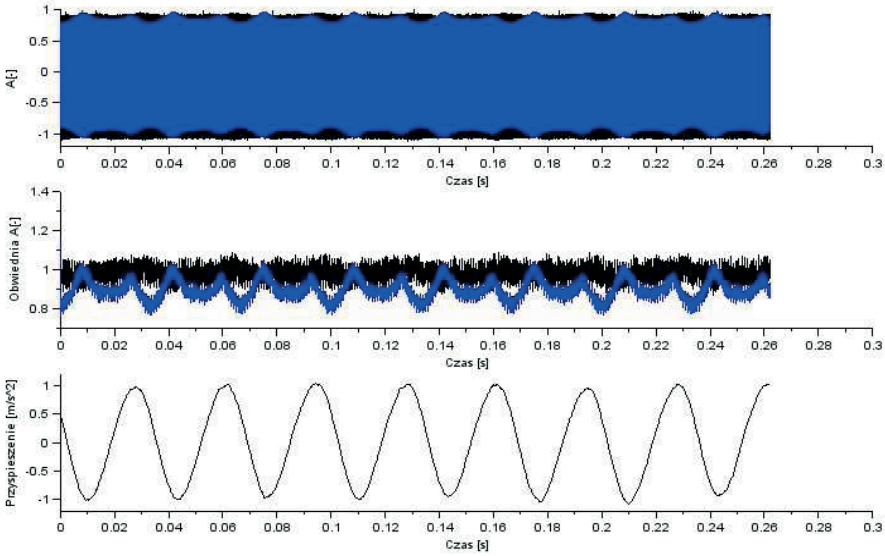
3. Analiza wyników

Celem analizy wyników było wykrycie modulacji amplitudowej zarejestrowanego

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

sygnału ultradźwiękowego, określenie cech charakterystycznych modulacji – amplitudy poszczególnych składowych, oraz ich korelacja z drganiami niskiej częstotliwości. Przetestowano dwa sposoby wykrywania modulacji: poprzez analizę w dziedzinie czasu i analizę w dziedzinie częstotliwości .

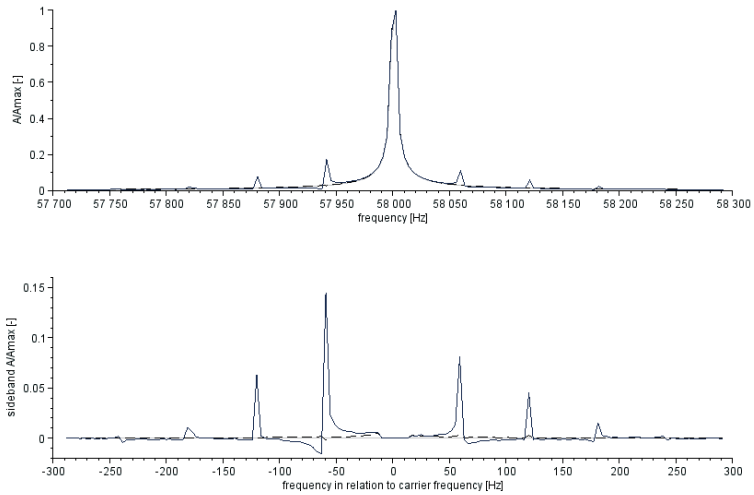
Analiza w dziedzinie czasu polega na wyznaczeniu obwiedni sygnału, czyli jak zmienia się jego amplituda w czasie. Do wyznaczenia obwiedni użyto transformaty Hilberta, w ten sposób otrzymano część zespoloną sygnału. Obwiednia jest wartością bezwzględną liczoną z próbek sygnału analitycznego składającego się części rzeczywistej – dane zarejestrowane i części urojonej – wynik transformaty. Na rys. 7 przedstawiono wyznaczenie obwiedni sygnału. Kolorem czarnym rysowane są wykresy dla próbki nieuszkodzonej, kolorem niebieskim rysowane są wykresy dla próbki po obciążeniu wywołującym zarysowanie płyty. Pierwszy wykres przedstawia zarejestrowane sygnały, drugi obwiednie, a trzeci przyspieszenia pomierzone akcelerometrem wywołane drganiami belki. W poniższym przykładzie częstotliwość drgań wynosi 30Hz, a fala jest rejestrowana na końcu belki, czyli po przejściu przez całą jej długość. Na wykresach widać, że amplituda fali ultradźwiękowej zmienia się w czasie cyklicznie, w przypadku próbki uszkodzonej. Okres tych zmian jest skorelowany z zapisem drgań, mimo że obwiednia nie jest sinusoidą. Na wykresach sygnałów zarejestrowanych dla próbki nieuszkodzonej wahania amplitudy są niższe od poziomu szumu. Powyższa metoda analizy pozwala łatwo odróżnić sygnały dla próbek uszkodzonych i nie uszkodzonych, a także pokazać korelację zjawiska modulacji z drganiami, jednak wyniki są trudne do parametryzacji, oraz wrażliwe na szumy i zniekształcenia sygnału.



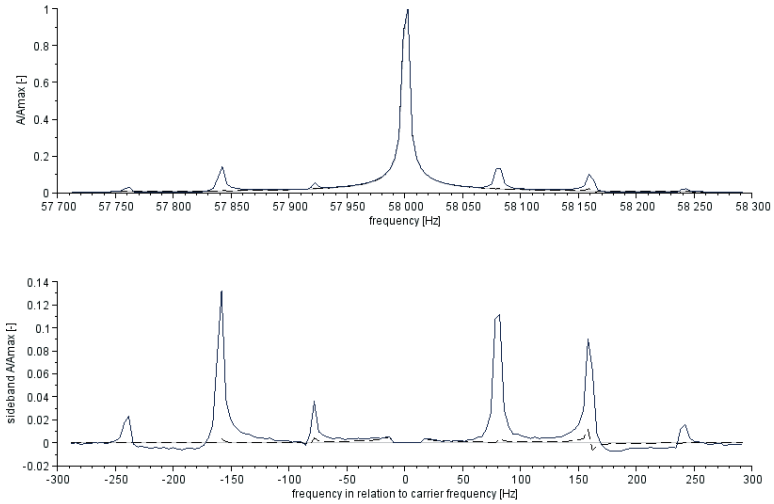
Rys. 7. Wynik analizy sygnału w dziedzinie czasu.

Kolejnym wykorzystanym narzędziem do analizy sygnałów była analiza w dziedzinie częstotliwości. Użyto transformaty Fouriera, a wykresy przedstawiające unormowane widma częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów pokazano poniżej. Modulacja amplitudowa sygnału skutkuje pojawieniem się na wykresach dodatkowych ekstremów odpowiadającym częstotliwościom będącym sumą, bądź różnicą częstotliwości fali ultradźwiękowej (58kHz) i wielokrotności częstotliwości drgań. Obszary po lewej i prawej stronie częstotliwości nośnej, tam gdzie znajdują się dodatkowe ekstrema noszą nazwę wstęg bocznych. Wartości amplitud składowych w tych obszarach niosą informację na temat kształtu i wielkości zjawiska modulacji. Dolne wykresy służą zwiększeniu precyzji prezentacji obszaru wstęg bocznych – usunięto na nich częstotliwość nośną. Na rys. 8 przedstawiono porównanie wykresów dla próbki niezarysowanej – kolor czarny linia

przerywana i zarysowanej – kolor niebieski linia ciągła - dla częstotliwości 80Hz i długości największej rysy równej 15 mm. Widać wyraźne różnice wartości dla częstotliwości przesuniętych o wielokrotności 80Hz względem 58kHz oznaczonej jako zero na dolnym wykresie. Wartości poszczególnych ekstremów bocznych w odniesieniu do amplitudy częstotliwości nośnej stanowią łatwe w interpretacji parametry porównawcze, gdyż ich obecność świadczy o występowaniu strefy zarysowanej.



Rys. 8. Spektra częstotliwościowe dla próbki niezarysowanej i próbki z pojedynczą rysą 15 mm dla częstotliwości drgań 60 Hz

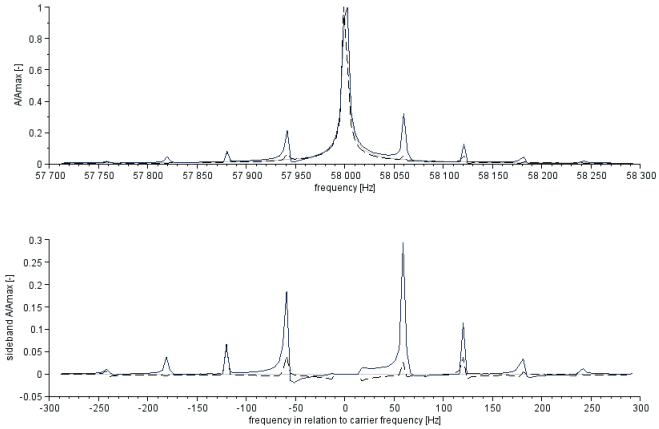


Rys. 9. Spektra częstotliwościowe dla próbki niezarysowanej i z pojedynczą rysą 15 mm dla częstotliwości drgań 80 Hz

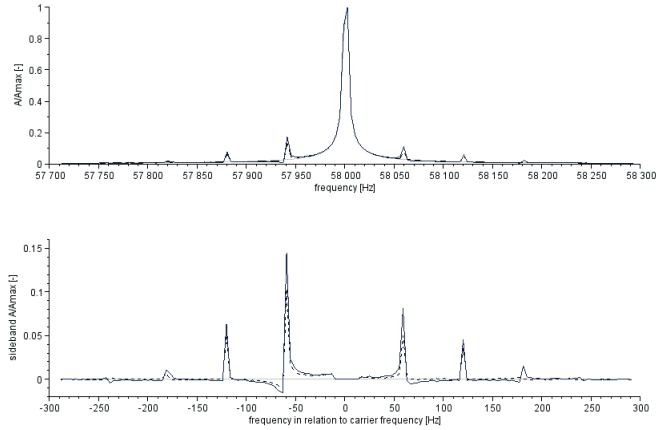
Na rys. 8 przedstawiono porównanie wykresów dla próbki niezarysowanej – kolor czarny linia przerywana i zarysowanej – kolor niebieski linia ciągła - dla częstotliwości 80Hz i długości największej rysy równej 15 mm. Widać wyraźne różnice wartości dla

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

częstotliwości przesuniętych o wielokrotności 60Hz względem 58kHz oznaczonej jako zero na dolnym wykresie. Wartości poszczególnych ekstremów bocznych w odniesieniu do amplitudy częstotliwości nośnej stanowią łatwe w interpretacji parametry porównawcze, gdyż ich obecność świadczy o występowaniu strefy zarysowanej. Rys. 9 przedstawia spektra częstotliwościowe dla próbki niezarysowanej i z próbki z pojedyncza rysą o długości 15 mm dla częstotliwości drgań 80 Hz. W tym przypadku modulacja z zastosowaniem częstotliwości zarówno 60 Hz jak i 80 Hz powoduje pojawienie się wyraźnych wstęg bocznych świadczących o wystąpieniu strefy zarysowania.



Rys. 10. Spektrum częstotliwościowe dla próbki zarysowanej ze strefą zarysowania o wysokości 15 mm (linia przerywana) i strefą zarysowania o wysokości 40 mm (linia ciągła)



Rys. 11. Zależność spektrum częstotliwościowego od mocy wzbudnika (linia ciągła – 100% mocy, linia przerywana – 25% mocy)

Na rys. 10 przedstawione są wyniki pomiarów dla próbek ze strefa zarysowania o wysokości 15 mm (linia czarna, przerywana) oraz dla próbek ze strefą zarysowania o wysokości 40 mm (linia niebieska ciągła). Wstęgi boczne w przypadku próbki ze znacznym zarysowaniem są około czterokrotnie większe niż wstęgi boczne dla próbki z małą strefą zarysowania.

Istotnym czynnikiem przy ocenie przydatności zjawiska inter-modulacji fal ultradźwiękowych jest wrażliwość metody na amplitudy drgań niskoczęstotliwościowych.

Zależność spektrum częstotliwościowego od mocy wzbudnika drgań niskiej częstotliwości przedstawiona jest na rys. 11. W badaniach porównano badania przy zastosowaniu 100% mocy wzbudnika oraz przy użyciu tylko 25% jego mocy. Przedstawione wyniki pokazują, że dla badanego elementu betonowego obniżenie mocy o ¾ nie powoduje znaczących zmian w wysokościach wstęg bocznych. Oznacza to, że dla badanego przypadku efektywności proponowanej metody nie jest wrażliwa na moc wzbudnika z przedziale od 100 do 24%.

4. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono badania eksperymentalne weryfikujące możliwość wykorzystanie zjawiska inter-modulacji fal ultradźwiękowych z pomocą drgań niskiej częstotliwości. Uzyskane wyniki pozwalają na wyciagnięcie wniosku, że zjawisko to umożliwia rozpoznawanie czy w elemencie betonowym są strefy zarysowane. Dalsze badania są niezbędne do ustalenia zależności pojawiania się wstęg bocznych na spektrach częstotliwościowych sygnałów pomiarowych, w zależności od rozmiaru stref zarysowania.

Literatura

1 Tellegen B. D. H. , Interaction between Radio-Waves, Nature 131, 840, 1933.
2 Chen X., Wang Y., Experimental and numerical study on microcrack detection using contact nonlinear acoustics, Front. Archit. Civ. Eng. China, 3(2): 137–141, 2009.
3 Parsons Z., Staszewski W. J., Nonlinear acoustics with low-profile piezoceramic excitation for crack detection in metallic structures, Smart Mater. Struct. 15, 1110–1118, 2009.
4 I. Didenkulov and A. Sutin, “Interaction of sound and vibrations in concrete with cracks,” AIP Conference, 2000.
5 Bruneau M., Potel C., Materials and Acoustics Handbook, ISTE Ltd, 2009.

Podziękowania

Artykuł wykonano w ramach projektu POIG 01.01.02-10-106/09 „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”. Badania eksperymentalne dofinansowane zostały z dotacji ze środków Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, przeznaczonych na wspieranie rozwoju młodych naukowców.

Diagnostics of concrete plate in bending with ultrasonic waves modulated by low frequency oscillations

Błażej Meronk[1], Krzysztof Wilde[1]

[1] *Department of Structural Mechanics and Bridges, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, e–mail: blazej.meronk@wilis.pg.gda.pl, krzysztof.wilde@wilis.pg.gda.pl*

Abstract: The paper presents the experimental study on the inter-modulation method for the diagnostics of concrete elements. The tests were conducted on a concrete plate subjected to ultrasonic waves and low frequency vibrations. The nonlinear acoustic effects, recorded in the experiments, made it possible to detect the presence of damaged zones. Further studies are necessary to establish the relation between the sidebanes of frequency spectra and the size of the damaged zone.

Keywords: ultrasonic testing, NDT, concrete elements, experimental study

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl