

Modulowane fale ultradźwiękowe w diagnostyce zginanych płyt betonowych

Błażej Meronk¹, Krzysztof Wilde²

^{1,2} *Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: ¹blazej.meronk@wilis.pg.gda.pl, ²krzysztof.wilde@pg.gda.pl*

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest eksperymentalnym badaniom diagnostyki zginanych elementów betonowych z zastosowaniem dwóch metod wykorzystujących modulowane fale ultradźwiękowe. Pierwsza metoda bazuje na modulacji, wymuszonymi drganiami niskoczęstotliwościowymi, uzyskanej z pomocą wzbudnika elektromagnetycznego. Druga metoda wykorzystuje modulację generowanego sygnału ultradźwiękowego bez wymuszania drgań niskich częstotliwości.

Słowa kluczowe: diagnostyka ultradźwiękowa, elementy betonowe, badania eksperymentalne

1. Wprowadzenie

Modulacja fal radiowych jest znana i powszechnie wykorzystywana, na przykład, we wszystkich urządzeniach przesyłających informację drogą radiową. Zjawisko to polega na modulacji amplitudy i częstotliwości fali ultradźwiękowej przez inną silną fałę [1]. Przykładem może być zjawisko Luxemburg–Gorky, które zostało odkryte dla fal radiowych przechodzących przez jonosferę lub plazmę, a które także występuje w problematyce diagnostyki elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem fal ultradźwiękowych. Systematyczny opis zjawisk nieliniowych towarzyszących propagacji fal ultradźwiękowych w ciałach stałych przedstawiony został w pracy [2]:

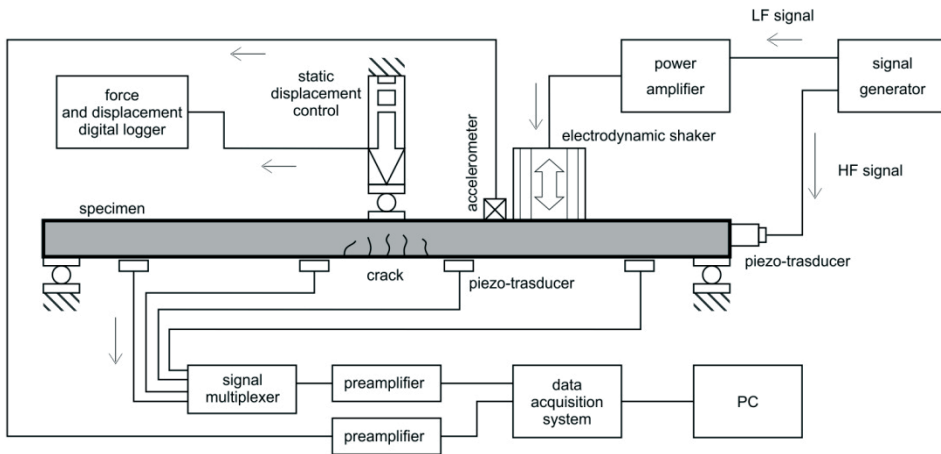
- powstawanie wyższych częstotliwości harmonicznych (parzyste i nieparzyste harmoniczne w zależności od rodzaju nieliniowości ośrodka i charakteru uszkodzenia);
- krzywa histerezy wynikająca z innych ścieżek przy obciążeniu i odciążeniu;
- efekty powolnej dynamiki (właściwości materiałowe zmieniają się w trakcie cyklicznego obciążania);
- przesunięcie częstotliwości rezonansowej (zależność od amplitudy fali nośnej);
- dyssypacja energii zależna od amplitudy fali (nie klasyczne mechanizmy tłumienia);
- intermodulacja fal (zjawisko analogiczne do efektu Luxemburg–Gorky);
- modulacja obwiedni fali (postawanie częstotliwości sub-harmonicznych);
- mieszanie częstotliwości (modulacja wibro-akustyczna).

Zaletą wykorzystania efektów nieliniowych propagacji fal ultradźwiękowych do diagnostyki elementów betonowych jest możliwość zwiększenia czułości urządzenia, ze względu na zwiększoną wrażliwość nieliniowych indeksów uszkodzenia w porównaniu do metod bazujących na sprężystych właściwościach propagujących fal. W niniejszym artykule przedstawiono drugi etap badań dotyczących diagnostyki elementów betonowych

z zastosowaniem modulowanych fal ultradźwiękowych [3], w której dopracowano stanowisko badawcze doposażając je w precyzyjny system sterowania statycznym ugięciem elementu betonowego oraz proponując i weryfikując metodę diagnostyki bazującą na intermodulacji fali bez użycia wzbudników niskoczęstotliwościowych.

2. Opis stanowiska badawczego

Badania eksperymentalne przeprowadzono na próbkach żelbetonowych, poddawanych jednoczesnemu działaniu obciążenia statycznego przy jednoczesnej, periodycznej transmisji i detekcji modulowanych amplitudowo fal ultradźwiękowych. Stanowisko składa się z (rys. 1): ramy wsporczej, próbki żelbetonowej, aparatury do wymuszania obciążeń statycznych, układu do generacji i rejestracji fali ultradźwiękowej [3].



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Aparatura do wymuszania obciążeń statycznych składa się z następujących elementów: ramy z poduszką pneumatyczną, czujnika siły, czujnika przemieszczeń i rejestratora cyfrowego. Rama z poduszką pneumatyczną (rys. 2) służy do przykładania, stałej w danym przedziale czasu, siły statycznej w dowolnym punkcie belki żelbetonowej. Wielkość wymuszenia jest regulowana za pomocą sprzężenia zwrotnego od czujnika siły. Tensometryczny czujnik siły umieszczony jest pomiędzy próbką a śrubą dociskową. Możliwy jest pomiar siły od zera do 10 kN. Elektrooptyczny inkrementalny czujnik przemieszczenia o dokładności 5 μm 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. Wzbudnik zasilany jest wzmacniaczem o prądzie maksymalnym 5 A. Sygnał sterujący pochodzi z generatora funkcyjnego. Urządzenie pozwala wprowadzać próbkę w drgania o częstotliwości od 20 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 wzбудnika był nieaktywny przy wykonywaniu eksperymentów z wykorzystaniem modulowanego sygnału wejściowego.



Rys. 2. Poduszka pneumatyczna (po lewej) oraz wzбудnik elektromagnetyczny (po prawej)

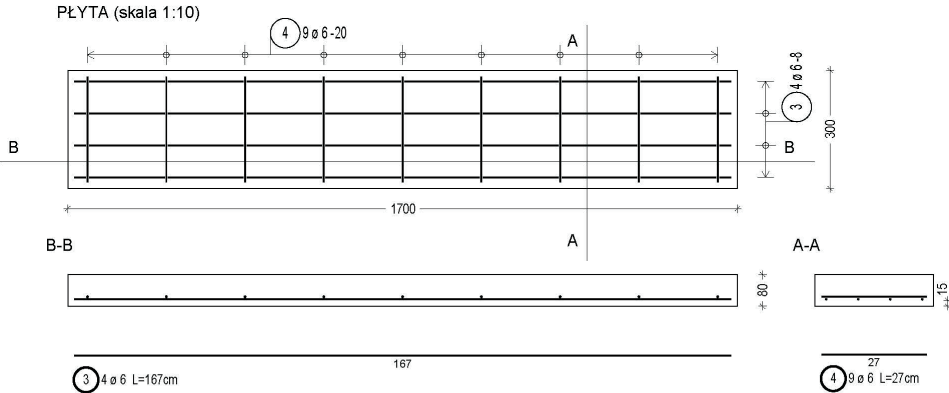
Fala diagnostyczna o centralnej częstotliwości 58 kHz generowana jest w sposób ciągły. Układ generacji i rejestracji fal ultradźwiękowych składa się z dwóch niezależnych systemów. Urządzenia generujące i rejestrujące zostały rozdzielone by uniemożliwić zakłócenia przy rejestracji fali. Taka konfiguracja, gdzie generator i rejestrator nie są połączone galwanicznie, daje pewność, że zarejestrowany sygnał o częstotliwości nośnej obrazuje intensywność fali ultradźwiękowej, a nie jest zakłóceniem wynikającym z przesłuchu pomiędzy urządzeniami. Fala ultradźwiękowa generowana jest za pomocą zmodyfikowanej sondy betonoskopu, skonstruowanej tak by najwyższą skuteczność uzyskać przy częstotliwości 58 kHz.

Eksperymenty z wykorzystaniem modulowanego sygnału wejściowego zrealizowano poprzez modulację amplitudową o głębokości 100% i częstotliwości modulującej 50Hz. Detekcja fali realizowana jest sekwencyjnie w czterech punktach rozłożonych po długości belki co 500 mm, za pomocą płytkowych elementów piezoelektrycznych. Następnie sygnał był wzmacniany, filtrowany analogowo i rejestrowany systemem akwizycji danych z częstotliwością 2 000 000 próbek na sekundę.

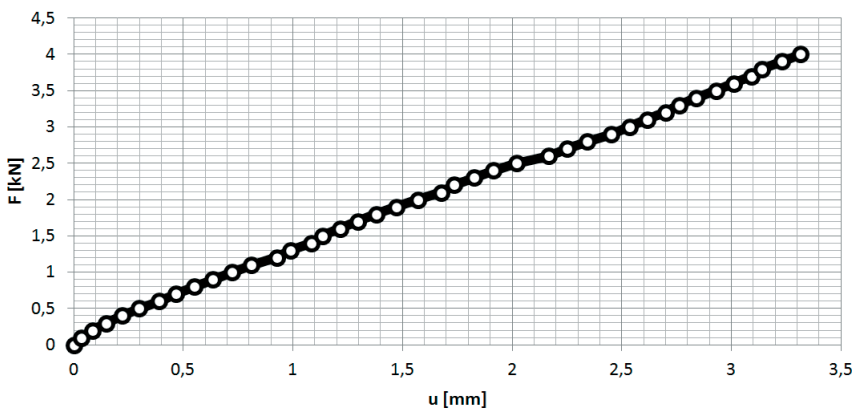
Wszystkie badania przeprowadzono na identycznych próbkach żelbetonowych. Próbki mają wymiary: długości 1700 mm, szerokości 300 mm i wysokość 80 mm (rys. 3). Wykonane są z betonu klasy C20/25. Zbrojenie stanowią cztery pręty średnicy 6 mm ze stali AIII-N, umieszczone przy dolnej płaszczyźnie próbki, na otuleniu 20 mm. W badaniach użyto 12 sztuk próbek. 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 zakłada się, że proces zagęszczania i dojrzewania mieszanki przebiegał dokładnie tak samo dla wszystkich próbek.

Testy wykonywano na belkach w trakcie przykładania obciążenia, w czasie tworzenia i rozwoju rys. Obciążenie zwiększano stopniowo od 0 do 4 kN wykonując pomiary ultradźwiękowe po każdym przyroście obciążenia o 0,1 kN. Zakres dobrano na podstawie wcześniejszych badań [3]. Rys. 4 przedstawia przykładowy cykl obciążenia i odciążenia

z zaznaczonymi punktami, w których wykonywano serie testów ultradźwiękowych. W każdej serii przeprowadzono badania z wykorzystaniem wzbudnika elektromagnetycznego pracującego z częstotliwością 50 i 80 Hz oraz badania bez wzbudnika, ale z wykorzystaniem modulowanego sygnału ultradźwiękowego.



Rys. 3. Zbrojenie badanej próbki betonowej

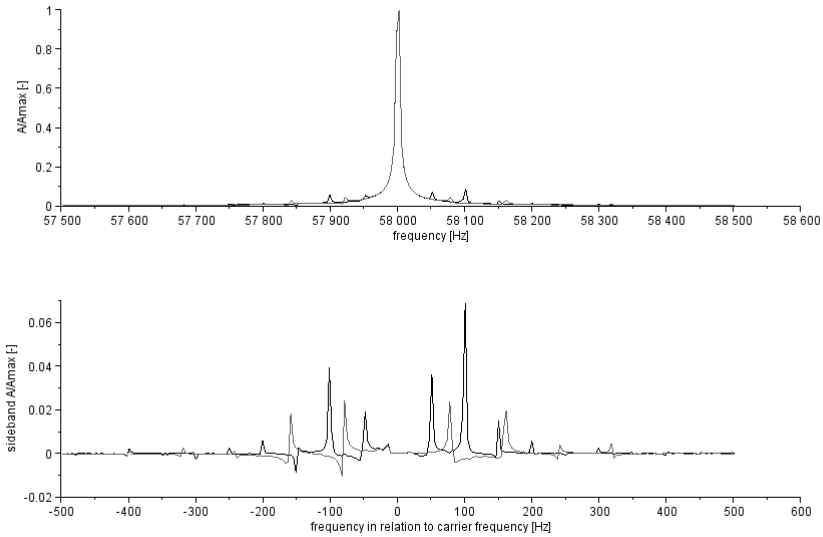


Rys. 4. Kolejne wartości obciążenia w funkcji ugięcia

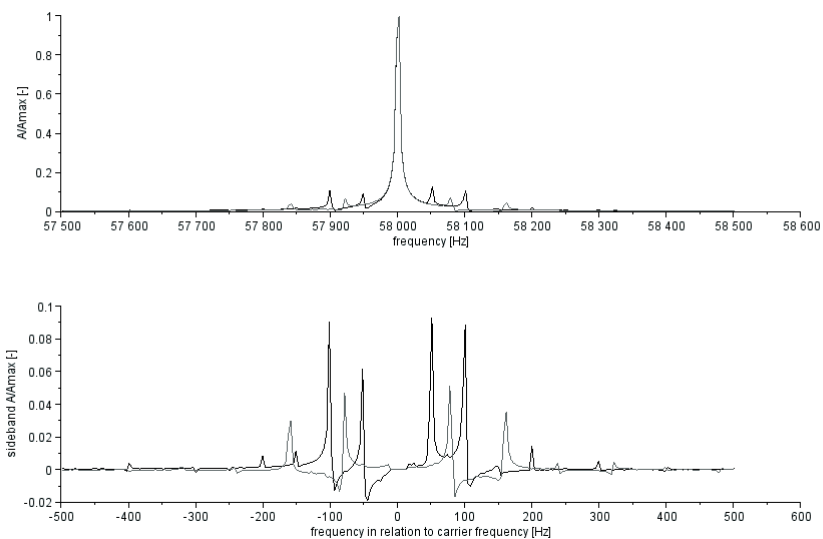
3. Analiza danych pomiarowych - eksperymenty z wykorzystaniem drgań niskiej częstotliwości

Celem analizy wyników było wykrycie modulacji amplitudowej zarejestrowanego sygnału ultradźwiękowego, określenie cech charakterystycznych modulacji – amplitudy poszczególnych składowych, oraz ich korelacja z drganiami niskiej częstotliwości. Modulację sygnału wykrywano z użyciem analizy sygnału w dziedzinie częstotliwości. Analizy wykonano wykorzystując transformatę Fouriera. Amplitudowa modulacja rejestrowanego sygnału skutkuje pojawieniem się dodatkowych ekstremów we wstęgach bocznych odsuniętych od fali nośnej (58 kHz) o częstotliwość modulującą (50 Hz i 80 Hz) i jej wielokrotności. Na wykresach 4 do 7 przedstawiono jak zmieniają się amplitudy poszczególnych składowych wstęg bocznych w trakcie zwiększania obciążenia i tworzenia się rysy. Dolne wykresy na poszczególnych rysunkach służą zwiększeniu precyzji

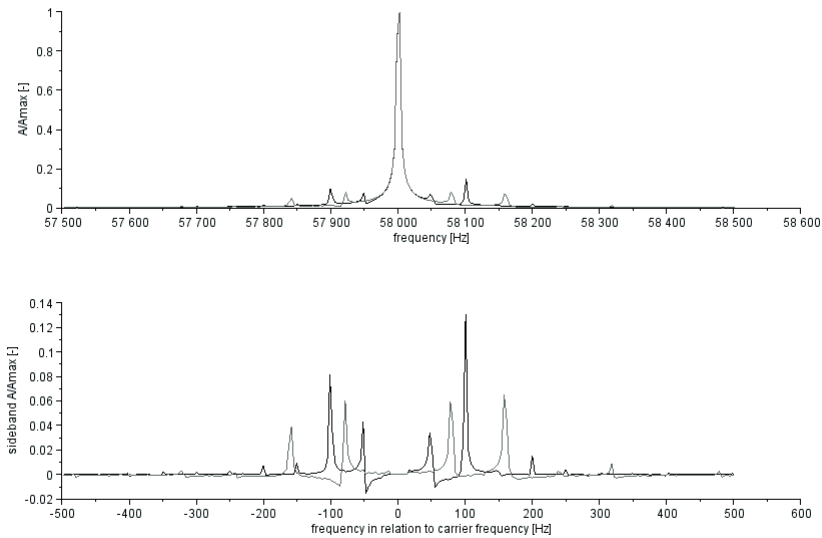
prezentacji obszaru wstęg bocznych – usunięto na nich częstotliwość nośną. Kolorem czarnym zaznaczono spektra pomierzone przy wzbudniku drgającym z częstotliwością 50 Hz, a kolorem szarym spektra pomierzone przy wzbudniku pracującym z częstotliwością 80 Hz. Amplitudy fal ultradźwiękowych najpierw narastają wraz z tworzeniem się rysy (Rys. 5, 6 i 7), następnie zmniejszają się (Rys. 8), gdy rozwarcie rysy jest duże. Wtedy drgania wzbudnika nie wystarczają by uzyskać efekt dynamicznego domknięcia się rysy. Po zdjęciu obciążenia i domknięciu rys są one dobrze wykrywane prezentowaną metodą, co było pokazane w poprzedniej pracy [3].



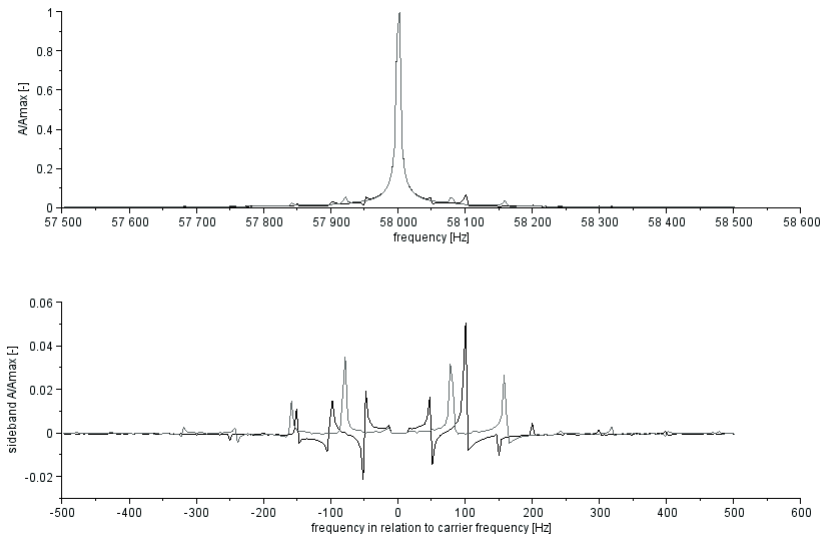
Rys. 5. Spektra częstotliwościowe dla próbki obciążonej siłą 900 N



Rys. 6. Spektra częstotliwościowe dla próbki obciążonej 1000 N



Rys. 7. Spektre częstotliwościowe dla próbki obciążonej 1100 N

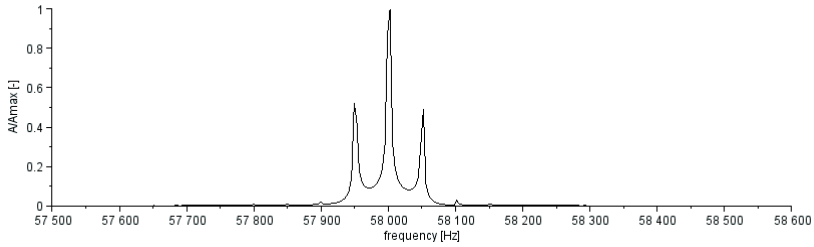


Rys. 8. Spektre częstotliwościowe dla próbki obciążonej 1200 N

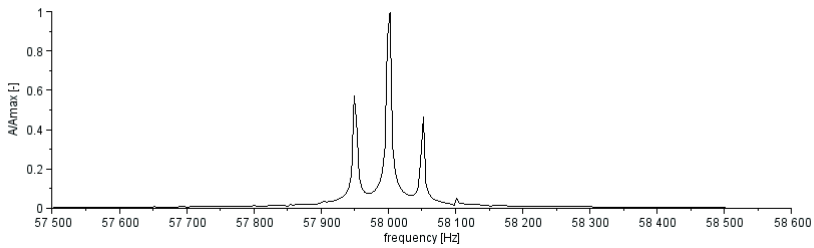
4. Analiza danych pomiarowych - eksperymenty z wykorzystaniem generacji sygnału modulowanego

W eksperymentach z wykorzystaniem generacji sygnału modulowanego wzбудnik elektromagnetyczny był wyłączony. Sygnał sinusoidalny (58kHz) modulowany amplitudowo częstotliwością 50 Hz o głębokości modulacji 100% przetransformowany do dziedziny częstotliwości ma spektrum o trzech wyraźnych ekstremach: jedno dla 58 kHz i dwa

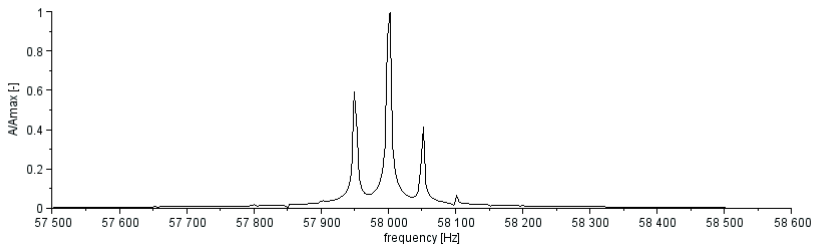
o połowę niższe przesunięte w lewo i prawo o 50Hz. Przy propagacji takiej fali przez ośrodek akustycznie nieliniowy (strefa zarysowana) dochodzi do auto-modulacji sygnału i rozszczepienia spektrum na kolejne częstotliwości odsunięte o wielokrotność 50 Hz. Analiza rejestrowanych sygnałów i prezentacja wyników została przeprowadzona analogicznie jak w rozdziale 3. Wykresy przedstawiają spektra rejestrowanego sygnału w tym samym przypadkach obciążenia (rys. 9, 10, 11 i 12).



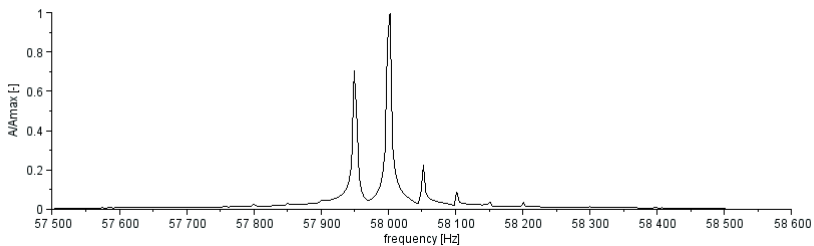
Rys. 9. Spektrum częstotliwościowe dla próbki obciążonej 900 N



Rys. 10. Spektrum częstotliwościowe dla próbki obciążonej 1000 N



Rys. 11. Spektrum częstotliwościowe dla próbki obciążonej 1100 N



Rys. 12. Spektrum częstotliwościowe dla próbki obciążonej 1200 N

5. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono badania eksperymentalne diagnostyki ultradźwiękowej elementów betonowych bazującej na efektach nieliniowych wykorzystujących modulowane fale nośne. W pracy zaproponowano metodę modulacji sygnału wejściowego bez użycia wzbudnika drgań niskoczęstotliwościowych. Wstępne badania eksperymentalne pokazały, że nowa prostsza do praktycznego zastosowania metoda także umożliwi wykrywanie rys elementów betonowych poprzez analizę pojawiających się sub-harmonicznych częstotliwości parzystych i nieparzystych. Dalsze prace ukierunkowane zostaną na poszukiwanie związków pomiędzy tworzonymi przez uszkodzenie częstotliwościami sub-harmonicznymi a intensywnością uszkodzenia.

Literatura

- 1 Tellegen B. D. H. , Interaction between Radio-Waves, Nature 131, 840, 1933.
- 2 Broda D., Staszewski W., Martowicz A., Uhl T., Silberschmidt V., Modelling of nonlinear crack-wave interactions for damage detection based on ultrasound – A review, Journal of Sound and Vibration, 333, 1097-1118, 2014.
- 3 Meronk B., Wilde K. Diagnostyka zginanej płyty betonowej z zastosowaniem fal ultradźwiękowych modulowanych drganiami niskich częstotliwości. 59 Konferencja Naukowa KILIW PAN oraz KN PZITB Krynica 2013.

Ultrasonic modulated waves for diagnostics of concrete elements in bending

Błażej Meronk¹, Krzysztof Wilde²

^{1,2} *Department of Structural Mechanics and Bridges, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology,*
e-mail: ¹blazej.meronk@wilis.pg.gda.pl, ²krzysztof.wilde@pg.gda.pl

Abstract: The paper presents the experimental study on the diagnostics of concrete elements with the use of nonlinear acoustic effects. The tests were conducted on a concrete plate subjected to ultrasonic waves modulated with and without an additional low frequency actuator. The experimental results showed that the new method based on the direct modulation of diagnostic ultrasonic waves also provided sub-harmonic frequencies that indicated the presence of damage. The new method does not require a low frequency actuator for generation of low frequency oscillations, and therefore, is more suitable for practical application.

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