

# LOGISTYKA WIBRODIAGNOSTYCZNYCH METOD BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

## LOGISTICS OF VIBRODIAGNOSTIC NON-DESTRUCTIVE METHODS

**Adam SZELEZIŃSKI**  
a.szelezinski@wm.am.gdynia.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Podstaw Techniki

**Tomasz MUCHOWSKI**  
t.muchowski6@gmail.com

**Adam MUC**  
a.muc@we.am.gdynia.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni  
Wydział Elektryczny  
Katedra Automatyki Okrętowej

### STRESZCZENIE

*W pracy przedstawiono analizę różnych wersji metod NDT opartych na wibrodiagnostyce ze szczególnym uwzględnieniem aspektu logistycznego. Jest to szeroka grupa metod badań NDT, która pozwala na stosowanie wielu technik i zróżnicowanych narzędzi. Umożliwia wykonywanie pomiarów zarówno w sposób kontaktowy jak i bezkontaktowy – w zależności od wymagań konstrukcji i środowiska. Stosując jednocześnie narzędzia obu rozwiązań można uzyskać bardziej wiarygodne wyniki w układach trudnych do analizy. Metoda wibrodiagnostyczna jest jedną z najnowocześniejszych metod NDT, co oznacza, że wykorzystuje najnowsze urządzenia pomiarowe i gwarantuje niezawodność i dokładność wyników dzięki komputeryzacji.*

### SUMMARY

*The paper presents an analysis of different versions of NDT methods based on vibrodiagnostics, with particular emphasis on the logistics aspect. It is a wide group of NDT research methods that allows the use of many techniques and different tools. It allows measurements to be made both in a contact and non-contact manner - depending on the requirements of the structure and the environment. Using the tools of both methods at the same time, more reliable results can be obtained in systems that are difficult to analyze. The vibrodiagnostic method is one of the most modern NDT methods, which means that it uses the latest measurement devices and guarantees reliability and accuracy of results through computerization.*

*Słowa kluczowe: NDT, wibrodiagnostyka, system, automatyzacja, logistyka*

*Keywords: NDT, vibrodiagnostic, system, automatization, logistics*

### WSTĘP

Badania nieniszczące (ang. *Non-destructivetesting*) są grupą badań pomiarowych pozwalających na uzyskiwanie informacji o stanie, właściwościach i występujących wadach

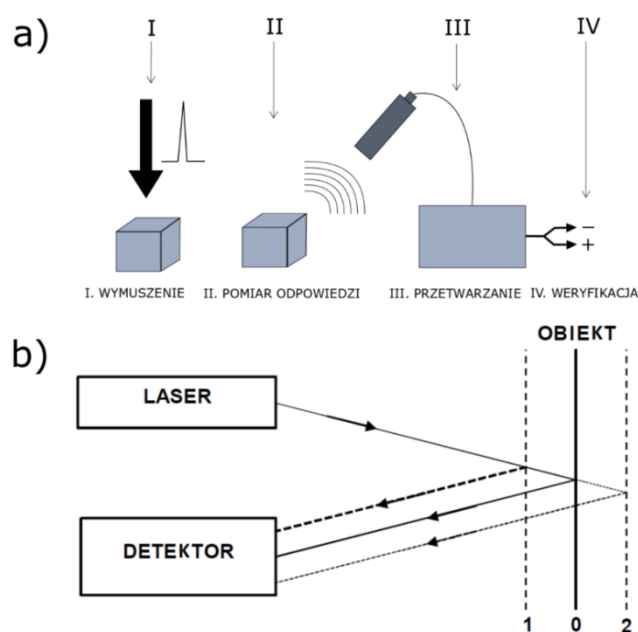
w badanym obiekcie bez ingerencji w jego cechy – nie naruszając jego spójności, czy degradując funkcjonalności i użyteczności (Lewińska – Romicka, 2001). Wibrodiagnostyka pozwala zbadać każdy obiekt wibrujący, lecz aktualny rozwój nauki w dziedzinach wibracji nie zawsze pozwala na poprawne zidentyfikowanie wad każdego obiektu. Specjaliści potrafią zidentyfikować defekty w zależności od stopnia swobody wibracji (Fritzen, 2014).

Rozwój logistyki wpływa na wzrost zainteresowania metodami badań NDT, ponieważ są one najbardziej optymalne względem stosunku kosztu do czasu badania i ilości wymaganych specjalistów. Powoduje to wzrost znaczenia badań NDT na rynku. Prowadzi także do zwiększenia oczekiwań stawianych wobec NDT, w wyniku czego metody pomiarowe muszą być stale udoskonalane.

Powszechnie wiadomo, że badania wibracyjne poprzez analizę sygnatur wibracyjnych pokazują różnice pomiędzy elementem sprawnym a uszkodzonym, a dzięki temu sygnały wibracyjne mogą być wykorzystane jako metoda pomiarowa, w celu wykrywania ewentualnych defektów. Znaczna ilość defektów w obiektach mechanicznych powoduje zwiększoną wibrację i hałas generowany przez obiekt. Jest to informacja, że obiekt jest w stanie krytycznym i może ulec uszkodzeniu (Fujifilm, 2009; Lewińska – Romicka, 2001; Aguilar, Ramirez, Haach i Pando, 2016).

Aktualnie, najbardziej obiecującymi metodami wibrodiagnostycznymi jest kontaktowa metoda wibracji wymuszonej i bezkontaktowa metoda wykorzystująca wibrometr laserowy (Aguilar, Ramirez, Haach i Pando, 2016; Malahs, 2015). Ideę obu metod pokazano na rysunku 1.

Stopień skomplikowania wykonywania pomiarów metodą wibrometryczną zależy od warunków środowiskowych i geometrii badanego obiektu. Na złożoność analizy i możliwości uzyskiwania poprawnych wniosków wpływa wiele aspektów, m.in. stopień swobody wibracji obiektu oraz tłumienie wibracji.



Rys. 1. Metody wibrodiagnostyczne, gdzie: a) kontaktowa metoda wibracji wymuszonej; b) bezkontaktowa metoda wykorzystująca wibrometr laserowy  
 Źródło: Opracowanie własne.

## 1. OPTIMALIZACJA BADAŃ WIBRODIAGNOSTYCZNYCH

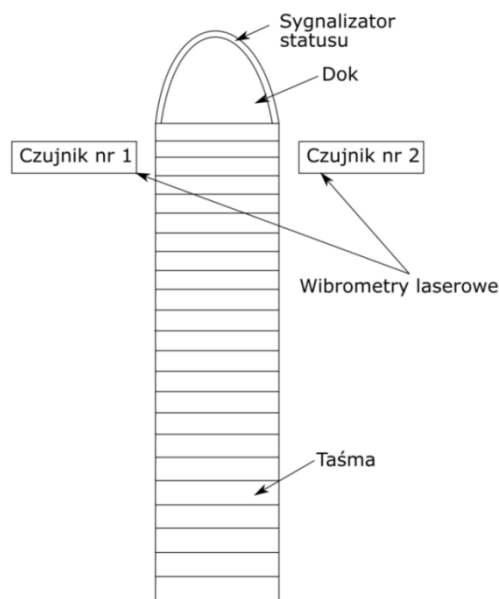
Pomiary i analizy wibrodiagnostyczne wykonywane są przez zespół specjalistów. Obiekt, który należy zbadać umieszczany jest na stanowisku testowym wyposażonym w instrumenty pomiarowe jednej z metod. Następnie wyszkolony operator dokonuje pomiarów wykorzystując dostępne narzędzia. Kolejnym etapem jest obróbka sygnałów wyjściowych, która także dokonywana jest przez specjalistę, a następnie kolejna wyszkolona osoba zajmuje się analizą danych i przedstawieniem wyników. Rozwiązanie to jest bardzo dobre i daje niezawodne, dokładne wyniki (Fritzen, 2014; Ross, Geske, Larson i Murphy, 1991; Aguilar, Ramirez, Haach i Pando, 2016; Huynh i Tran, 2004). Nie jest jednak optymalne – badanie pojedynczego obiektu wymaga dużej ilości czasu i wyszkolonych specjalistów. Nie jest to więc najlepsze rozwiązanie do zastosowania w skali przemysłowej. Patrząc przez pryzmat logistyki, nie jest to opłacalne rozwiązanie.

Badania wibrodiagnostyczne można jednak znacznie zoptymalizować. Większość czynności związanych z badaniem należy zautomatyzować (Christen i Bergamini, 2006; D'Orazio, Leo, Distante, Guaragnella, Pianese i Cavaccini, 2008; Yella, Dougherty i Gupta, 2006). Obróbka sygnałów wyjściowych polega najczęściej na usunięciu szumów – zagadnienie to można zautomatyzować tworząc skrypt, który będzie dokonywał obróbki za operatora. Analiza danych również częściowo może odbywać się w sposób automatyczny – wystarczy stworzyć gotowe rozwiązanie programowe, które będzie porównywać dane z bazą

istniejących już analiz i w przypadku istnienia znacznego podobieństwa klasyfikować obiekt na podstawie danych obiektu referencyjnego pochodzącego z bazy danych. Jeśli obiekt ma sygnaturę drganiową zgodną z obiektami w bazie danych, zostaje automatycznie sklasyfikowany przez oprogramowanie. Jeśli jednak obiekt jest unikalny, trafia wtedy na stanowisko testowe, na którym zostanie dokładnie przebadany przez specjalistę, a jego sygnatura wraz z klasyfikacją zostaje wprowadzona do bazy danych, w ten sposób analiza kolejnego obiektu, zgodnego z jego sygnaturą odbędzie się automatycznie. Samo dokonywanie pomiarów można zoptymalizować wykorzystując odpowiednie maszyny. Etapem pierwszym pomiaru, jest pomiar za pomocą bezkontaktowej metody wykorzystującej wibrometr laserowy. Obiekty do zbadania umieszczane są na taśmie przesuwanej je do przodu. W momencie, w którym obiekt dociera do czujników, taśma zatrzymuje się i wywołuje wibracje. Czujniki dokonują odczytów i przesyłają je do obróbki i analizy, a obiekt trafia na dok. Następnie sygnatura wibracyjna obiektu porównywana jest z sygnaturami z bazy danych, jeśli występuje zgodność z nieuszkodzonymi obiektami referencyjnymi, obiekt sklasyfikowany zostaje jako nieuszkodzony i może zostać oddany do dalszej eksploatacji. Jeśli jednak sygnatura zostaje nierozpoznana, obiekt przechodzi drugi etap badania – jest nim pomiar za pomocą kontaktowej metody wymuszenia. Obiekt odbierany jest z doku. Na podstawie koloru sygnalizatora pracownik decyduje czy obiekt umieszczony zostanie w maszynie pomiaru czy zostanie oddany do użytku. Na rysunku 2 przedstawiono wyobrażenie maszyn pomiarowych etapu pierwszego. Na rysunku 3 przedstawiono wyobrażenie maszyn pomiarowych etapu drugiego. Sygnaturę wibracyjną z pierwszego i drugiego pomiaru porównuje się z sygnaturami z bazy danych, w przypadku zgodności z obiektami uszkodzonymi lub nieuszkodzonymi (ustalone za pomocą metody kontaktowej) obiekt zostaje automatycznie sklasyfikowany i usunięty lub poddany dalszej eksploatacji (w przypadku defektu nie wpływającego na sukcesywną eksploatację). W przypadku niezgodności z obiektami z bazy danych poddawany jest dalszym badaniom przeprowadzonym przez specjalistów i zostaje wprowadzony do bazy danych.

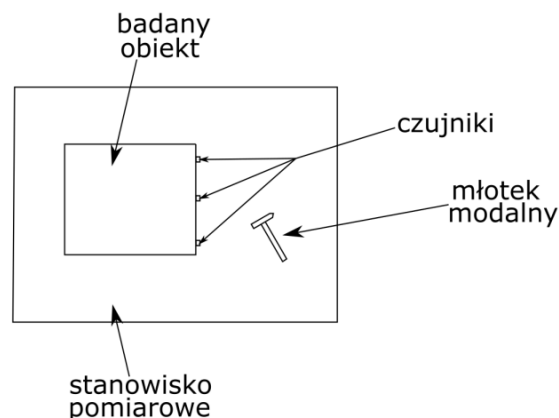
Ponieważ obróbka sygnału wyjściowego z kilku czujników, jak i ich analiza musi odbywać się w czasie rzeczywistym, wymagana jest duża moc obliczeniowa. Zwykły komputer może nie wystarczyć, by dokonać wymaganych obliczeń na czas i może stanowić wąskie gardło (ang. *bottleneck*) operacji. Szczególnie, jeśli dane przetwarzane pochodzą będą z kilku stanowisk testowych jednocześnie. Wymagane może być złożenie specjalnej jednostki obliczeniowej.

Na rysunku 2 przedstawiono taśmę, która przesuwa obiekty do miejsca, w którym zostaną poddane pomiarom za pomocą wibrometrów laserowych. Dane zostają przesłane do analizy poprzez sieć LAN. Następnie obiekt trafia na dok, z którego jest odbierany przez pracownika. Sygnalizator statusu zapala się na jeden z dwóch kolorów: zielony lub czerwony. Kolor zielony informuje pracownika, że obiekt posiada podobną sygnaturę drganiową do obiektu z nieuszkodzonego obiektu z bazy danych i może zostać poddany dalszej eksploatacji. Kolor czerwony informuje o konieczności poddania obiektu pomiarom w etapie drugim.



Rys. 2. Schemat maszyny etapu pierwszego badań  
Źródło: Opracowanie własne.

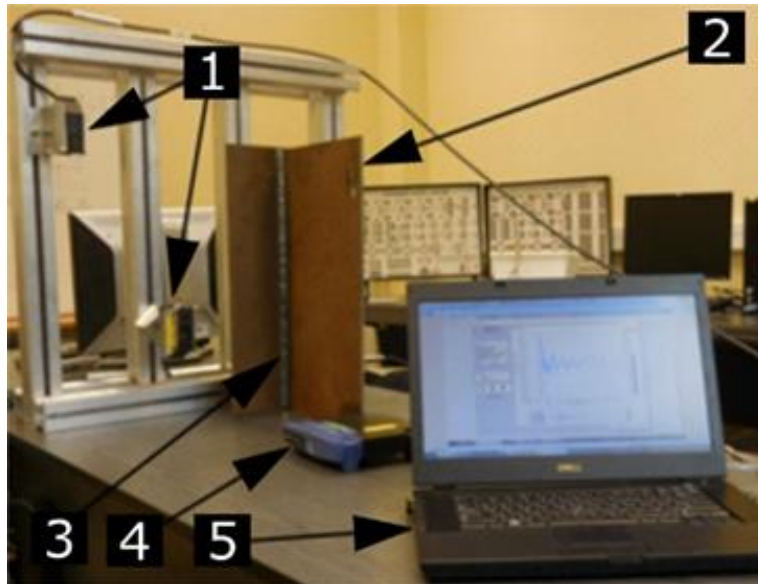
Na rysunku 3 przedstawiono obiekt, który umieszczany jest na stanowisku pomiarowym. Rozmieszczone zostały na nim czujniki oraz pomiarowiec wymusza wzbudzenia za pomocą młotka modalnego. Dane z czujników zostają przesłane do analizy.



Rys. 3. Schemat maszyny etapu drugiego badań  
Źródło: Opracowanie własne.

## 2. PROTOTYP STANOWISK POMIAROWYCH

Autorzy artykułu stworzyli prototyp stanowisk pomiarowych. Potwierdza on słusność teoretycznego konceptu. Nie zapewnia jednak pełnej automatyzacji operacji (brak maszynarii CNC i rozbudowanej bazy danych sygnatur wibracyjnych). Na rysunku 4 przedstawiono prototyp stanowiska pomiarowego etapu pierwszego (w formie pozwalającej zaprezentować wszystkie elementy).

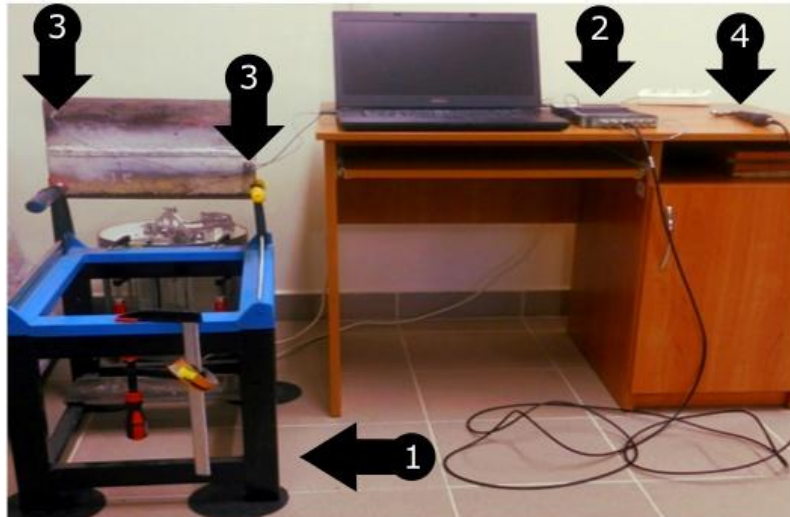


Rys.4. Zdjęcie przedstawiające prototyp stanowiska pomiarowego (etap pierwszy), gdzie: 1 - czujnik laserowy, 2 - stelaż na którym zamocowano czujniki, 3 - badany obiekt (wady spawalnicze), 4 - router LAN, 5 - komputer kontrolujący proces

Źródło: Opracowanie własne.

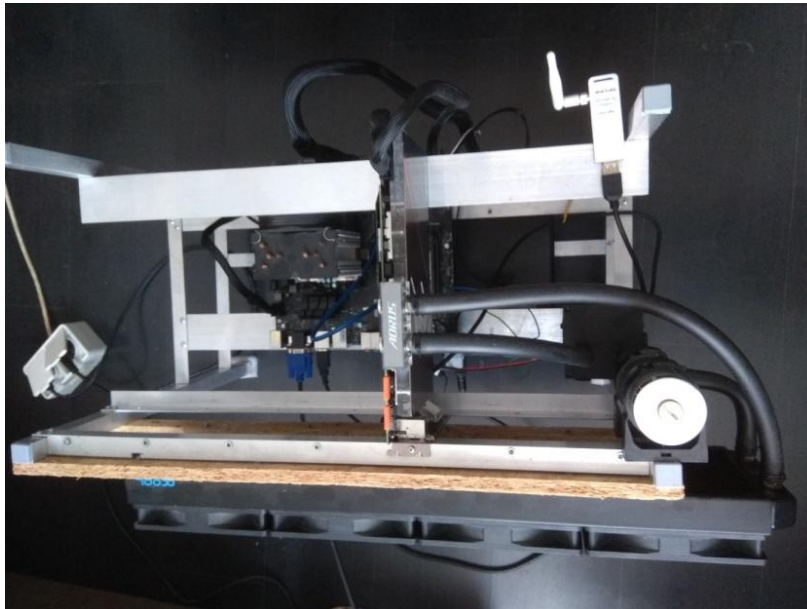
Czujniki przekazują dane do jednostki obliczeniowej poprzez sieć LAN. Komputer podłączony do sieci poprzez Wi-Fi pozwala kontrolować cały proces. Służy do inicjalizowania pomiaru, odbierania danych z jednostki obliczeniowej oraz wyświetlania rezultatów operatorowi. Na rysunku 5 przedstawiono prototyp stanowiska pomiarowego etapu drugiego (w formie pozwalającej zaprezentować wszystkie elementy).

Czujniki przekazują dane do analizatora drgań, który przekazuje wyniki do jednostki obliczeniowej. Komputer kontroluje proces. Sprzęt pomiarowy połączony jest siecią LAN z jednostką obliczeniową, która dokonuje obróbki sygnału, a następnie przeprowadza analizę. Wynik analizy przesyłany jest na komputer operatora poprzez otwarty port komunikacyjny. Wynik jest informacją dla operatora o stanie obiektu na podstawie, której operator decyduje o usunięciu obiektu, poddaniu go naprawie lub oddaniu go do eksploatacji. Na rysunku 6 przedstawiono prototyp jednostki obliczeniowej.



Rys.5. Zdjęcie przedstawiające prototyp stanowiska pomiarowego (etap drugi), gdzie:  
 1 - stojak na którym zamocowany jest obiekt (wada spawalnicza), 2 - analizator drgań,  
 3 - czujniki (akcelerometry), 4 - młotek modalny do wymuszeń wibracji  
 Źródło: Opracowanie własne.

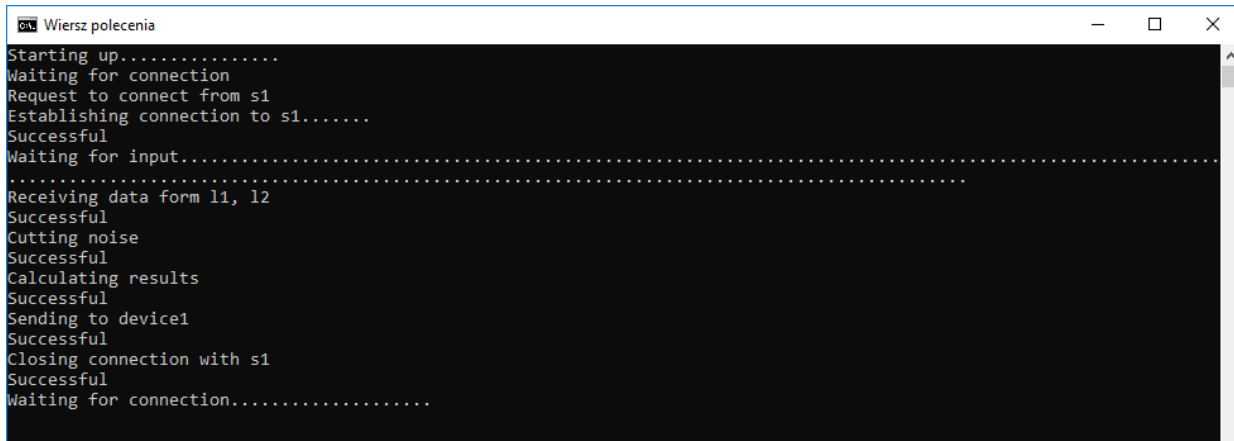
Jednostka obliczeniowa wyposażona jest w procesor oraz kartę graficzną. Rozdzielając obliczenia pomiędzy te dwa komponenty dysponuje się mocą obliczeniową wystarczającą by obsłużyć prototypowe stanowiska testowe w czasie rzeczywistym.



Rys.6. Zdjęcie przedstawiające prototyp jednostki obliczeniowej  
 Źródło: Opracowanie własne.

Oprogramowanie napisane zostało w taki sposób by głównie obciążało obliczeniami kartę graficzną, a procesor podejmował się tylko tych kalkulacji, które nie były możliwe, lub wydajne na GPU. Oprogramowanie usuwające szumy przetwarza każdy otrzymany sygnał w następujący sposób: porównany jest on ze sygnałem zawierającym wyłącznie drgania

środowiskowe, a następnie zostaje skrócony o wspólną część (fragment sygnału odpowiadający jedynie drganiom środowiskowym to szum). Na rysunku 7 przedstawiono zdjęcie z programu informujące o etapie obliczeń. Wynikiem analizy jest komunikat „defective (nr sygnatury z bazy danych)”, „good (nr sygnatury z bazy danych)” oraz „not found” przesyłane na urządzenie kontrolujące proces (w przypadku autorów – laptop).



```
Wiersz polecenia
Starting up.....
Waiting for connection
Request to connect from s1
Establishing connection to s1.....
Successful
Waiting for input.....
.....
Receiving data form l1, l2
Successful
Cutting noise
Successful
Calculating results
Successful
Sending to device1
Successful
Closing connection with s1
Successful
Waiting for connection.....
```

Rys.7. Zdjęcie z procesu uruchomionego na jednostce obliczeniowej (pojedyncza analiza); s1 – stanowisko nr 1, l1 – czujnik laserowy nr 1, l2 – czujnik laserowy nr 2  
Źródło: Opracowanie własne.

### 3. PODSUMOWANIE

Wykonywanie badań NDT jest kosztownym zabiegiem, lecz wykrywanie wad eksploatowanych obiektów jest bardzo istotne. Eksploatowany wadliwy obiekt może ulec całkowitemu uszkodzeniu lub wywołać uszkodzenie mechanizmów, których jest częścią. Wibrodiagnostyka, jako metoda diagnostyczna, cechuje się niezawodnością i dokładnością, lecz aktualne sposoby budowy stanowisk i stosowany przebieg badań wymagają dużych zasobów i zaangażowania zbyt wielu specjalistów.

Autorzy podjęli próbę znalezienia rozwiązania tego problemu. Wynikiem było wypracowanie idei zastąpienia aktualnych stanowisk testowych maszynami CNC oraz zautomatyzowania procesu obróbki sygnału i jego analizy. Artykuł ten opisuję tę ideę i przedstawia prototypy, które stworzyli autorzy. Wykorzystano również sprawdzoną w środowisku informatycznym sieć LAN. Na potrzeby prototypu stworzono oprogramowanie komputerowe, które umieszczono na jednostce obliczeniowej. Ponieważ jest to prototyp we wczesnym stadium rozwoju, nie oferuje on pełnej automatyzacji, którą oferować ma gotowy system pomiarowy.



## LITERATURA

- Aguilar, R. Ramirez, E. Haach, V. G. Pando, M. A. (2016). Vibration-based nondestructive testing as a practical tool for rapid concrete quality control. *Construction and Building Materials, Tom 104*, 181-190.
- Christen, R. Bergamini, A. (2006). Automatic flaw detection in NDE signals using a panel. *NDT & E International, Tom 39 Numer 7*, 547-553.
- D'Orazio, T. Leo, M. Distante, A., Guaragnella, C. Pianese, V. Cavaccini, G. (2008). Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials. *NDT & E International, Tom 41 Numer 2*, 145-154.
- Fritzen, C. (2014). *Vibration-Based Methods for SHM*. Germany: NATO.
- FUJIFILM. (2009). *FUJIFILM Technical Handbook: The Fundamentals of Industrial Radiography*. USA: Fujifilm.
- Huynh, D. Tran, D. (2004). *A Non-Destructive Crack Detection Technique Using Vibration Tests*. Referat wygłoszony na: Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04). Footscray.
- Lewińska – Romicka, A. (2001). *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo – Techniczne.
- Malahs, M. (2015). *Design of a Low Cost Laser Vibrometer System*. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.
- Ross, R. J. Geske, E. A. Larson, G. H, Murphy, J. F. (1991). *Transverse Vibration Nondestructive Testing Using a Personal Computer*. USA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Yella, S. Dougherty, M. S. Gupta, N. K. (2006). Artificial intelligence techniques for the automatic interpretation of data from non-destructive testing. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Tom 48 Numer 1*, 10-20.