

Dr inż. Mirosław NEJMAN, dr inż. Joanna KOSSAKOWSKA,  
mgr inż. Krzysztof BŁAŻEJAK,  
inż. Mateusz DOBRZYŃSKI (Politechnika Warszawska):

## **BADANIE PRZYDATNOŚCI MACIERZY MIKROFONÓW DO DIAGNOSTYKI STANU OSTRZA PRZY TOCZENIU**

### Streszczenie

Przemysł związany z obróbką skrawaniem w coraz większym stopniu podlega automatyzacji. Elementem wpływającym na jakość i wydajność produkcji jest stan krawędzi skrawającej. Dlatego trwają prace nad budową systemów diagnostyki stanu ostrza. Koszt budowy takiego systemu to również koszt zastosowanych czujników. W artykule przedstawiono wykorzystanie tanich mikrofonów do budowy toru pomiarowego systemu diagnostycznego.

**Słowa kluczowe:** *stan ostrza skrawającego, toczenie*

## **EVALUATION OF MICROPHONES ARRAY USABILITY FOR TOOL WEAR MONITORING IN TURNING**

### Abstract

The machining industry is more and more automated. The element affecting the quality and productivity is the condition of the cutting edge. Therefore, the continuous quest for reliable tool condition monitoring system can be observed in many laboratories. The cost of such a system is highly dependent on cost of sensors used. The article presents the use of cheap microphones to create a measuring chain of the diagnostic system.

**Keywords:** *tool wear monitoring, monitoring of CNC machines, data acquisition*

# **BADANIE PRZYDATNOŚCI MACIERZY MIKROFONÓW DO DIAGNOSTYKI STANU OSTRZA PRZY TOCZENIU**

Mirosław NEJMAN<sup>1</sup>, Joanna KOSSAKOWSKA, Krzysztof BŁAŻEJAK,  
Mateusz DOBRZYŃSKI

## 1. WSTĘP

Od wielu lat trwają badania mające na celu budowę skutecznego systemu diagnostyki narzędzia i procesu skrawania. Systemy te są coraz bliższe fazy komercjalizacji. Niestety punktem zaporowym dla mniejszych firm może się okazać koszt aparatury takiego systemu. Profesjonalne czujniki często kosztują kilkadziesiąt tysięcy złotych za jeden tor pomiarowy, a skuteczny system diagnostyczny powinien zawierać ich kilka. W ramach pracy postanowiono samodzielnie zbudować tor pomiarowy, bazując na tanich wkładkach mikrofonów pojemnościowych. Pomimo wykazanych literaturze ograniczeń stosowalności mikrofonów, skuteczność toru pomiarowego nawet w ograniczonym zakresie mogłaby zachęcić potencjalnych użytkowników do zakupu droższych i bardziej uniwersalnych systemów. Ograniczeniem stosowalności mikrofonów jest obróbka bez chłodziwa, zarówno ze względu na niebezpieczeństwo ich uszkodzenia oraz na to że podawanie chłodziwa może zakłócać dźwięk generowany przez proces skrawania. Być może system oparty na mikrofonach znalazłby zastosowanie podczas obróbki materiałów drzewnych ze względu na to, iż właśnie tam nie stosuje się chłodziwa.

W wielu pracach naukowych wykazano, że podstawą budowy skutecznego systemu diagnostyki jest dobór czujników. Najczęściej stosowane są czujniki sił, emisji akustycznej, drgań, mocy oraz czasem mikrofony. Niezaprzeczalnie najlepsze wyniki w warunkach laboratoryjnych uzyskiwane są z torów pomiarowych zawierających czujniki sił [2,4,5]. W warunkach przemysłowych są jednak olbrzymie kłopoty z instalacją tego typu czujników i z tego powodu często korzysta się z mniej dokład-

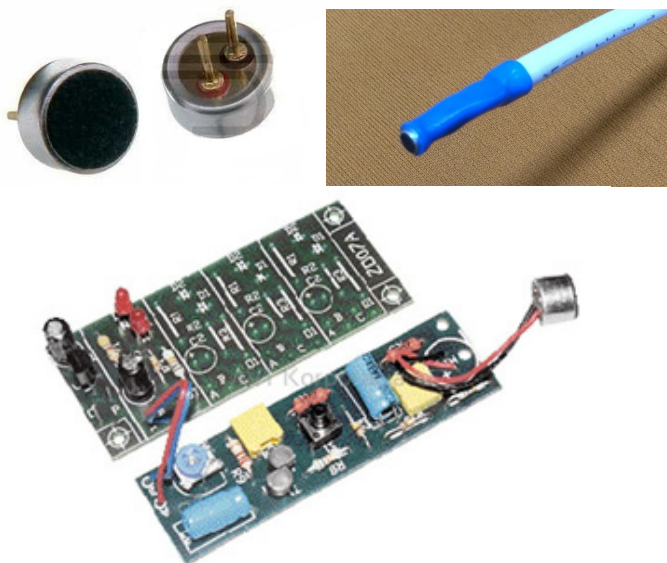
---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania; 02-524 Warszawa; ul. Narbutta 86  
tel.: +48 22 234-82-59, e-mail: m.nejman@zaoios.pw.edu.pl

nych czujników prądu i mocy [9,10]. Kolejne w stosowności są czujniki drgań szeroko opisywane zarówno w artykułach dotyczących obróbki metali jak i drewna [1,6,7,10,11]. Najbardziej podatnymi na zakłócenia sygnałów są mikrofony, nie mniej jednak ich niski koszt oraz łatwość instalacji są dla wielu naukowców ważnym argumentem aby stosować coraz to nowsze algorytmy analizy sygnałów, aby zbyt łatwo nie odrzucić tego typu czujników [5,11].

## 2. OPIS METODYKI BADAŃ

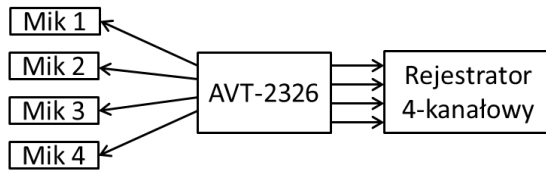
Analizując różne dostępne typy przetworników mikrofonów, zdecydowano się na wybór mikrofonu pojemnościowego, głównie ze względu na jego szerokie pasmo przenoszenia od około 100 do 16kHz oraz dość płaską charakterystykę. Dodatkowym atutem tego wyboru jest niska cena zakupu, ok 2 zł za sztukę. Zdecydowano się na zakup czterech wkładek mikrofonowych firmy Ningbo Kepo Electronics, model EM-4522P (rys. 1)



Rys. 1. Mikrofon pojemnościowy EM-4522P oraz układ zasilania oraz wstępnego przygotowania sygnału AVT-2326

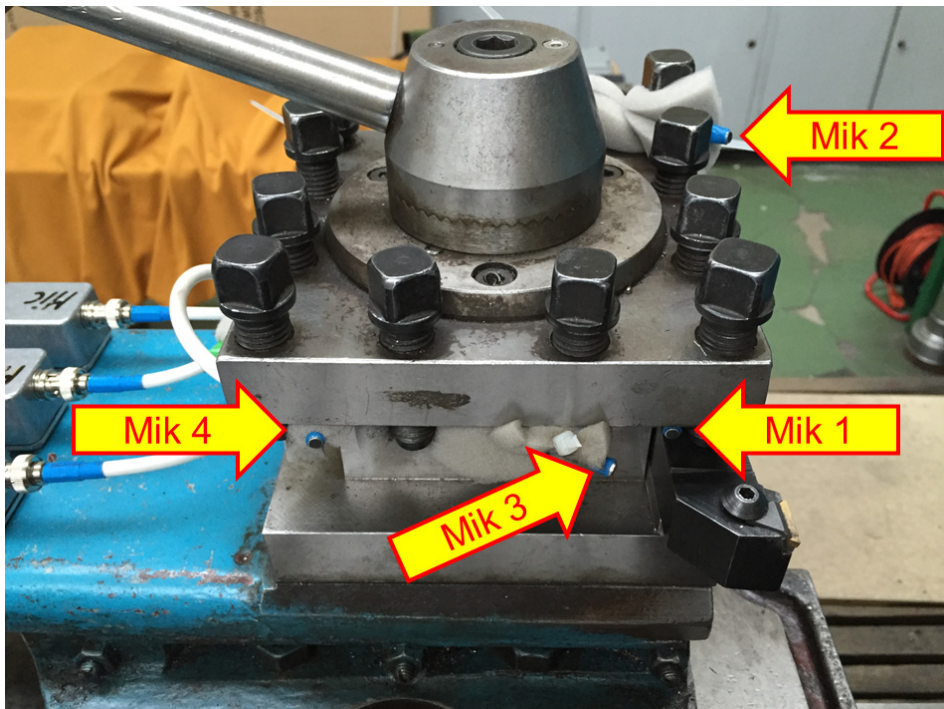
W pracy jako układ wstępnego przygotowania sygnału zastosowano zestaw przygotowania sygnału AVT-2326 (rys. 1). Schemat toru pomiarowego przedstawiono na rys. 2. Składa się on z 4 kanałów, umożliwiających jednoczesne podłączenie 4 mikrofonów, oraz stabilizatora (jednego dla wszystkich kanałów). Celem minimalizacji

wpływu zakłóceń, mikrofony zostały połączone ze wzmacniaczem przewodem ekranowanym, o długości nieprzekraczającej 1 [m].



Rys. 2. Schemat toru pomiarowego

Zestaw czterech takich mikrofonów został zainstalowany na imaku tokarki TUD 50 (rys. 3). Taki sposób montażu zapewnia stałą odległość mikrofonów od strefy skrawania. Każdy został skierowany w inną stronę co ułatwiło analizę porównawczą sygnałów dla dokładnie tego samego eksperymentu skrawania. Mikrofon Mik1 został zamocowany wzdłuż noża tokarskiego, schowany pod imak narzędziowy, co miało go chronić przed bezpośrednimi uderzeniami wiórów.



Rys. 3. Imak narzędziowy z zamontowanymi mikrofonami

Mik2 umieszczono na imaku i skierowano pod kątem około 45% w stosunku do osi przedmiotu obrabianego, na kierunku wrzeciona tokarki, tak aby rejestrować właśnie dźwięk przez nie generowany. Mik3 zamontowano wzdłuż osi przedmiotu obrabianego i skierowano na naroże. Mik4 umieszczono podobnie jak Mik1 tyle że po przeciwnej stronie imaka narzędziowego, również prostopadłe do osi przedmiotu obrabianego.

Przedmiotem obrabianym był wałek ze stali 45 o wymiarach  $d=150\text{mm}$ ,  $l=1200\text{mm}$ , Podzielono go na odcinki około 100mm tak, aby każde przejście narzędzia trwało około 50 sekund. Obróbkę przeprowadzono za pomocą narzędzia typu CTGPR 2525 M 16, w którym mocowano płytki typu TPGN 160304 o gatunku 1025 firmy Sandvik. Założono 15min. okres trwałości ostrza i dla danego materiału obrabianego oraz typu noża dobrano następujące parametry skrawania:  $f=0,13\text{mm/obr}$ ,  $a_p=2,5\text{mm}$ ,  $v_c=205\text{m/min}$ .

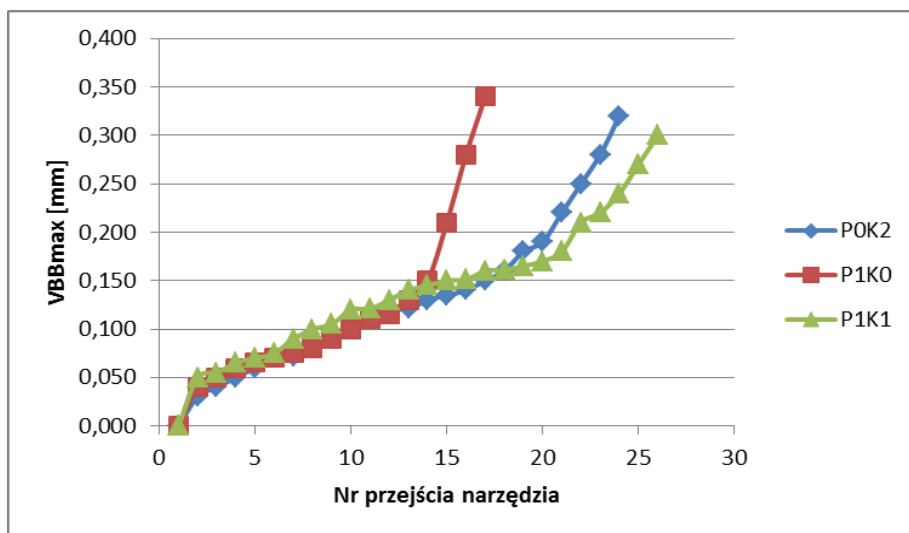
Po każdym przejściu narzędzia zdejmowano płytkę skrawającą, wykonywano pomiar zużycia na mikroskopie warsztatowym oraz dokumentowano formę zużycia na zdjęciu za pomocą prostego mikroskopu z wbudowaną kamerą, podłączaną do komputera przez port USB. Jako graniczą wartość zużycia przyjęto  $V_{BB\text{max}}=0,3\text{mm}$ . Przeprowadzono badanie kilku okresów trwałości ostrza, na potrzeby tego artykułu wybrano trzy i przyjęto oznaczenia kolejnych krawędzi skrawających w formacie P[nr]K[nr], gdzie P[nr] oznacza numer płytki a K[nr] numer krawędzi skrawającej. Np. P0K2 oznacza płytkę 0, krawędź 2.

Sygnały z mikrofonów rejestrowano z częstotliwością próbkowania 100kHz na kanał, tak aby uniknąć zjawiska aliasingu, za pomocą karty pomiarowej NI USB-6259. Jako jednostkę fizyczną mierzonych sygnałów zastosowano miliwolt, gdyż sygnały nie służą do opisu zjawiska dźwięku, a tylko z sygnałów wyznaczane były miary diagnostyczne, dla których jednostka fizyczna nie ma znaczenia.

### 3. WYNIKI POMIARÓW I WYZNACZENIE MIAR SYGNAŁÓW

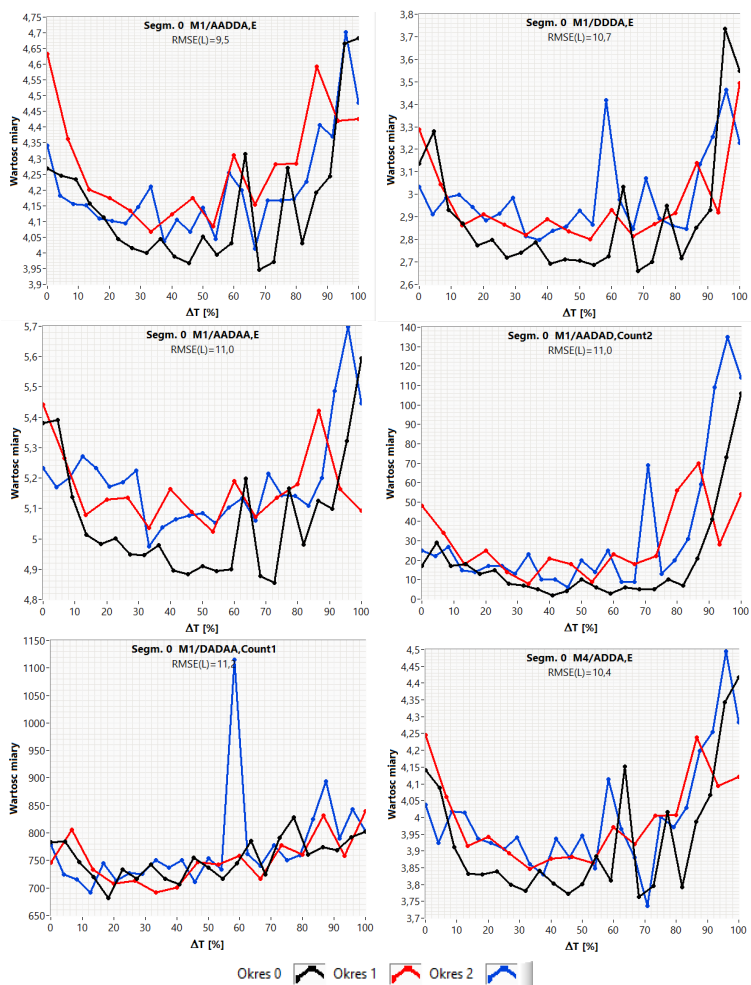
Aby wyeliminować przypadkowość uzyskanych wyników pomiarów, próby skrawania wraz z pomiarem sygnałów z mikrofonów przeprowadzono dla trzech okresów trwałości ostrza. Wyniki pomiarów zużycia przedstawiono na rys. 4. Dwie próby miały dość powtarzalny wynik, trzecia była nieco krótsza.

Przed przystąpieniem do analizy sygnałów, polegającej na odpowiednim ich przetworzeniu i wyodrębnieniu miar, sygnały uprzednio przygotowano. Przygotowanie polegało na wycięciu reprezentatywnych, dwusekundowych fragmentów sygnałów z każdego pliku, w miarę możliwości nie zakłóconych przez wióry uderzające w którykolwiek mikrofon.



Rys. 4. Wyniki pomiarów zużycia ostrzy P0K2, P1K0 i P1K1

Do ekstrakcji miar z sygnałów diagnostycznych zastosowano Generator Miar, zrealizowany w ramach [3]. Za pomocą generatora automatycznie zostały wycięte z poszczególnych plików jednosekundowe fragmenty, które następnie poddano Pakietowej Transformacji Falkowej (WP5), otrzymując w efekcie dla danego pliku 63 sygnały pasmowe dla każdego z czujników (mikrofonów), co daje łącznie 252 sygnały pasmowe. Dla każdego z tych sygnałów zostały wyznaczone następujące miary: wartość skuteczna (rms); moda; skośność; kurtoza; wartość peak-to-peak (PP); współczynnik szczytu (CF); energia (E); entropia Shannona; inkrement; liczba przekroczeń progu 1 (Count1) – liczba przekroczeń progu wynoszącego 30% wartości maksymalnej sygnału podczas pierwszej operacji; czas ponad progiem 1 (Pulse 1) – procentowy udział czasu sygnału ponad progiem wynoszącym 30% wartości maksymalnej sygnału podczas pierwszej operacji liczbę przekroczeń progu 2 (Count2) – liczba przekroczeń progu wynoszącego 50% wartości maksymalnej sygnału podczas pierwszej operacji; czas ponad progiem 2 (Pulse2) – procentowy udział czasu sygnału ponad progiem wynoszącym 50% wartości maksymalnej sygnału podczas pierwszej operacji; liczbę przekroczeń progu 3 (Count3) – liczba przekroczeń progu wynoszącego 70% wartości maksymalnej sygnału podczas pierwszej operacji; czas ponad progiem 3 (Pulse 3) – procentowy udział czasu sygnału ponad progiem wynoszącym 70% wartości maksymalnej sygnału podczas pierwszej operacji; energia PSD sygnału.



Rys. 5. Miary wyselekcjonowane za pomocą Testera Zużycia Ostrza

Biorąc pod uwagę łączną liczbę sygnałów pasmowych oraz liczbę wyznaczonych z nich miar, otrzymano łącznie 3784 miary. Przy tak dużej liczbie miar niemożliwym jest ręczna selekcja oraz ocena miar skorelowanych ze stanem narzędzia, dlatego w tym celu zastosowano Tester Zużycia Ostrza opisany w [5].

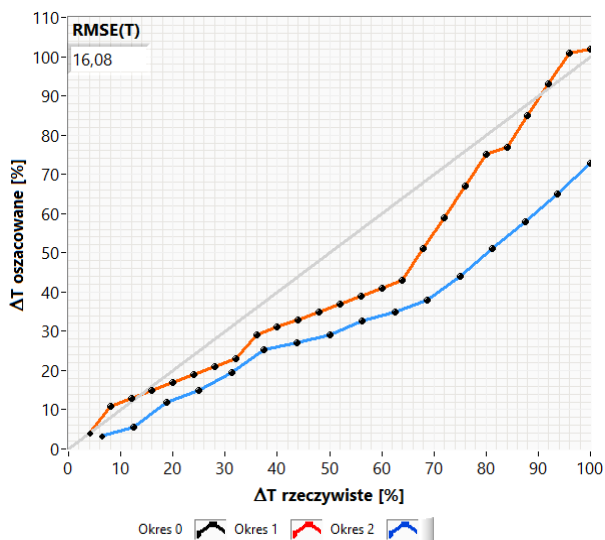
W wyniku działania testera wytypowano 6 miar, przydatnych w stosowanej w testerze strategii szacowania zużycia ostrza RMSE(T). Przebieg tych miar w funkcji wykorzystanego okresu trwałości ostrza te przedstawiono na rys. 5. Wyselekcjonowane miary to:

- Energia pakietu AADDAA dla mikrofonu nr 1
- Energia pakietu ADDA dla mikrofonu 4

- Energia pakietu DDDA dla mikrofonu 1
- Energia pakietu AADAA dla mikrofonu 1
- Liczba przekroczeń progu nr 2 pakietu AADAD dla mikrofonu 1
- Liczba przekroczeń progu nr 1 pakietu DADAA dla mikrofonu 1

Za najlepsze czujniki uznane zostały mikrofony 1 oraz 4, zaś za najlepsze miary: Energia oraz liczby przekroczeń progu. Nie mniej jednak w wyniku analizy uzyskano wiele innych miar, skorelowanych ze zużyciem, (np. RMS, PP), które to jednak zostały przez algorytm uznane za podobne do miar już wyselekcjonowanych i przez to odrzuconych. Dużo trudniej jednak było znaleźć miary dla czujników Mik2 oraz Mik3, które byłyby dobrze skorelowane ze stanem narzędzia, zatem umiejscowienie tych mikrofonów należałoby uznać za mniej korzystne.

Na rys. 6 przedstawiono wyniki oszacowanego zużycia ostrza. Z wykresu wynika, że wyniki szacowania zużycia za pomocą testera nie odbiegają zbytnio od rzeczywistego pomiaru. Zatem uzyskano satysfakcjonujący wynik budując tor pomiarowy z wykorzystaniem tanich elementów pomiarowych.



Rys. 6. Wynik oszacowanego zużycia ostrza (RMSE(T)) za pomocą Testera Zużycia Ostrza

### 3. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W ramach badań zarejestrowano sygnały z czterech mikrofonów podczas toczenia stali 45, dla trzech okresów trwałości ostrza. Z powodzeniem wyznaczono miary skorelowane ze zużyciem narzędzia oraz wskazano najlepsze miejsca montażu mikrofonów.



Niewątpliwą zaletą opracowanego systemu jest jego niski koszt, który być może będzie argumentem za stosowaniem układów diagnostyki w procesie skrawania metali, dla procesów w których nie stosuje się chłodziwa. Ograniczeniem stosowalności mikrofonów jest obróbka bez chłodziwa, ze względu na niebezpieczeństwo ich uszkodzenia. Warto byłoby powtórzyć testy dla obróbki materiałów drzewnych, o której wspomniano w pracy, ze względu na to iż właśnie tam nie stosuje się chłodziwa.

W pracy wykazano również, że najłatwiej było wyznaczyć miary skorelowane ze zużyciem narzędzia dla mikrofonów Mik1 i Mik4, natomiast mikrofony Mik2 i Mik3 rejestrowały również dźwięki z otoczenia. Interesujące jest zagadnienie, czy udałoby się znaleźć metodę matematyczną taką, która umożliwiłaby od sygnałów z Mik1 i Mik4 odejmować miary sygnałów Mik2 i Mik3, tak aby z sygnałów skrawania odjąć dźwięki pochodzące z otoczenia, a tym samym poprawić jeszcze skuteczność korelacji miar ze zużyciem narzędzia.

Warto byłoby również przeprowadzić próby, dla których przedłużono by prowadzenie eksperymentu skrawania aż do wystąpienia KSO. Po pierwsze dlatego aby sprawdzić, czy dalszy wzrost zużycia narzędzia będzie powodował dalszy wzrost miar (czy nie za wcześnie postawiono kryterium stopienia ostrza), po drugie interesująca byłoby weryfikacja czy udaje się wykrywać KSO za pomocą sygnałów z mikrofonów.

#### LITERATURA

- [1] Czarniak P. Jarosław Górski J. Nejman M *Using vibration signal for tool wear monitoring during the milling of laminated chipboard and MDF*, Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW Forestry and Wood Technology No 56, 2005: 126-130
- [2] Jemieliński K., 2002: Tool condition and cutting process monitoring. (Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania). Oficyna Wydawnicza PW. Warszawa, 256 pp
- [3] Jemieliński K., Bombiński S., Kossakowska J., Budowa i testowanie Generators Miary, Projekt kluczowy „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Warszawa 2009
- [4] Jemieliński K., Urbański T., Kossakowska J., Bombiński S *Tool condition monitoring based on numerous signal features* Int J Adv Manuf Technol (2012) 59:73–81
- [5] Kossakowska J, Bombiński S, Jemieliński K. Zaawansowane metody analizy sygnałów w diagnostyce stanu narzędzia, Inżynieria Maszyn, (2014) ISSN 1426-708X, pp. 88-101
- [6] Lemaster R. Lu L. Jackson S. The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 1. Sensor selection Forest Products Journal Vol. 50, No 7/8 (2000) 31-38
- [7] Lemaster R. Lu L. Jackson S. The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 1. Use of a vibration accelerometer to monitor tool wear and workpiece quality Forest Products Journal Vol. 50, No 7/8 (2000) 59-64
- [8] [www.montronix.com](http://www.montronix.com)
- [9] [www.prometec.de](http://www.prometec.de)
- [10] Szwałka K. Górski J. Evaluation *Tool Condition of Milling Wood on the Basis of Vibration Signal* Journal of Physics: Conference Series 48 (2006) 1205–1209
- [11] Wilkowski J. Górski J. *Vibro-Acoustic Signals As A Source Of Information About Tool Wear During Laminated Chipboard Milling Wood Research* 56 (1): 2011 57-66