

# System diagnostyki procesu mikroskrawania

Bogdan Broel-Plater, Paweł Waszczuk, Artur Kobyłkiewicz

W e współczesnej technice, od urządzeń multimedialnych po technologie kosmiczne, dąży się do jak największej miniaturyzacji. Oczywiście jest fakt, iż osiągnięcie takiego celu byłoby bardzo trudne i kosztowne, gdyby realizować go z użyciem obrabiarek zaprojektowanych do obróbki dużych elementów konstrukcyjnych. Wykorzystywanie specjalnie zaprojektowanych maszyn do obróbki mikroelementów (o wymiarach rzędu milimetra i detalach rzędu pojedynczych mikrometrów) niesie z sobą problemy niespotykane podczas obróbki w skali makro. W celu zapewnienia wysokiej jakości mikroobróbki przy jednoczesnej minimalizacji kosztów produkcji należy wykorzystywać specjalistyczny system diagnostyczny umożliwiający nie tylko pełną „obserwację” procesu obróbczego, ale także wspomagającą optymalizację pracy układów wykonawczych mikroobrabiarki.

W ramach projektu badawczo-rozwojowego „Budowa prototypowego systemu do badań mikroobróbki skrawaniem – badania i modelowanie procesu” powstało zintegrowane stanowisko mikroobróbki wraz z unikatowym systemem diagnostycznym, w którym fuzja danych uzyskiwanych z wieloosiowych pomiarów sił i przyspieszeń oraz pomiarów wibroakustycznych wykorzystana jest do nadzorowania procesu mikroobróbki.

## Diagnostyka procesu mikroskrawania

System diagnostyczny według prac [1–2] musi zagwarantować dokładność, jakość i przede wszystkim stabilność obróbki. Wykorzystywane w tym celu przebiegi czasowe wybranych wielkości – mierzone *online* – są w systemie diagnostycznym poddawane analizie w celu wyodrębnienia zdarzeń istotnych z punktu widzenia diagnozowanego procesu. W tym celu stosuje się różnorodne transformaty, które charakteryzują się odmiennymi właściwościami i pozwalają na odpowiednią interpretację sygnału i wyekstrahowanie z niego zagregowanych, istotnych informacji o przebiegu nadzorowanego procesu.

Najczęściej wykorzystywanym przykładem takiej analizy jest szybka transformata Fouriera (FFT), gdyż zgodnie z [3] dostarcza ona wielu ważnych informacji na temat analizowanego sygnału. W wyniku zastosowania FFT otrzymuje się informację o spektrum mocy obrazującą energię zawartą w poszczególnych pasmach częstotliwości analizowanego sygnału.

Kolejnym przekształceniem jest analiza czasowo-częstotliwościowa (STFT). Jej działanie opisane w [4] polega na obliczaniu transformaty FFT dla na tyle krótkotrwałych „porcji” sygnału, aby ich właściwości częstotliwościowe – w ramach pojedynczej „porcji” – były możliwie stałe. Pozwala to na przedstawienie zmian spektrum mocy sygnału w czasie.

Niedogodnością FFT jest to, że przejście z dziedziny czasu do częstotliwości powoduje utratę informacji o tym, kiedy dane „zdarzenie częstotliwościowe” miało miejsce. Jak podają prace [5–6], transformata falkowa pozwala na przeniesienie sygna-

**Streszczenie:** Istotnym elementem procesu mikroobróbki ubytkowej metalu jest system nadzorujący i kontrolujący w czasie rzeczywistym jego przebieg. W artykule przedstawiono taki system, opracowany w ramach jednego z projektów badawczych, realizowanych na ZUT w Szczecinie. Opiszano metody analityczne szeroko stosowane w diagnostyce, w tym szybką transformatę Fouriera (FFT) czy dyskretną transformatę falkową. Przedstawiono unikatową konstrukcję obrabiarki, jej części składowe oraz przedstawiono schemat działania systemu diagnostycznego. Zaprezentowano pierwsze wyniki prowadzonych badań, które potwierdzają postawione w artykule tezy.

## DIAGNOSIS SYSTEM OF MICRO-MACHINING PROCESS

**Abstract:** Real-time monitoring and controlling system is an important element of micro-machining process. The article presents such a system, developed in a research project on ZUT in Szczecin. It describes the analytical methods widely used in the diagnosis, including the fast Fourier transform (FFT) or discrete wavelet transform. It also describes a unique design of the machine, its components, and presents a scheme of a diagnostic system. The results of the analysis included in the article confirm correctness of used methods.

łu z układu czas–wartość do układu czas–skala, dzięki czemu umożliwia ona analizę zmian częstotliwości sygnału w funkcji czasu. W odróżnieniu od transformaty Fouriera, analiza falkowa dokonuje rozbicia sygnału na sygnały elementarne zwane falkami; są to przebiegi oscylacyjne o różnych czasach trwania i o zróżnicowanym widmie. Wielką zaletą analizy falkowej, w stosunku do analizy częstotliwościowej, jest fakt, iż rozdzielczość czasowa transformacji może się zmieniać, ponieważ jest ona zależna od częstotliwości falki.

## Projekt mikrofrezarki

W fazie projektowania urządzenia przeanalizowano szereg konstrukcji, opisywanych w literaturze, w celu określenia wymagań, jakie musi spełniać zarówno konstrukcja korpusu, jak i elementy wykonawcze budowanej mikrofrezarki. W wyniku tych prac wybrano do realizacji konstrukcję obrabiarki z poziomym elektrowrzecionem poruszającym się wzdłuż poziomej osi Z i ruchem obrabianego przedmiotu w płaszczyźnie X–Y.

Napęd wrzeciona stanowi silnik BLDC zapewniający prędkość obrotową narzędzia do 100 000 obr./min, którego sterownik umożliwia zdalne sterowanie prędkością. Do prawidłowej

pracy elektrowrzeciona niezbędne jest dostarczenie sprężonego powietrza o ciśnieniu od 0,5 do 0,8 bara, chroniącego ceramiczne łożyska od zanieczyszczeń, a także zasilenie w wodę układu chłodzenia.

Jako silniki osi obrabiarki zastosowano serwonapędy liniowe, które charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami pracy – rozdzielczość enkoderów rzędu 1 nm oraz dokładność pozycjonowania rzędu 3  $\mu\text{m}$  przy powtarzalności dwukierunkowej rzędu 100 nm. Serwonapęd osi pionowej obrabiarki wykorzystuje pneumatyczny siłownik tłokowy jednostronnego działania w celu skompensowania wpływu masy obciążenia.

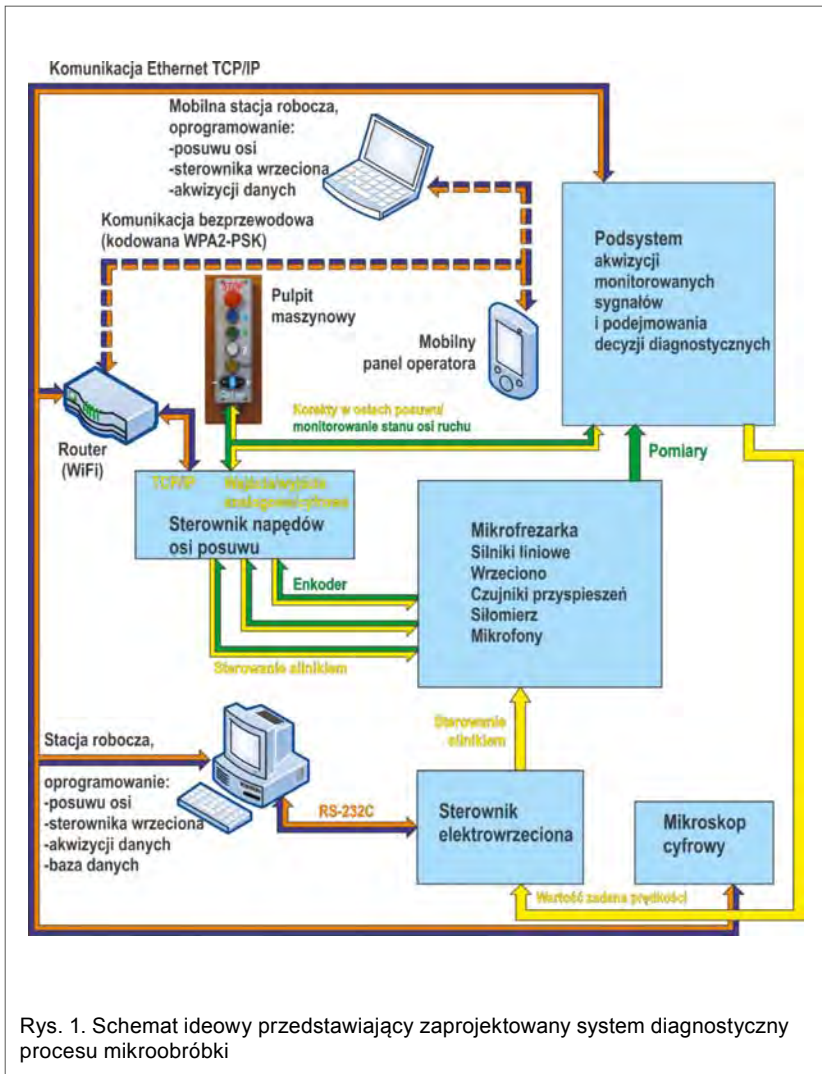
Materiałem zastosowanym do budowy korpusu jest granit charakteryzujący się drobnym ziarnem, niskimi naprężeniami wewnętrznymi oraz ujednoliczoną strukturą wewnętrzną. Ten rodzaj kamienia jest stosowany między innymi do produkcji granitowych płyt pomiarowych. Projekt układu korpusowego zapewnia montaż układów napędowych zgodny z wymaganiami ich producenta oraz umożliwia pozycjonowanie napędów względem siebie w trakcie montażu. Kalibracji dokonano z wykorzystaniem maszyny współrzędnościowej, dzięki czemu otrzymano prostopadłość oraz równoległość powierzchni urządzenia, mieszcząc się w 5. klasie dokładności.

Całe urządzenie zostało postawione na specjalnie skonstruowanym stojaku i zamknięte w obudowie (1200 mm  $\times$  1000 mm  $\times$  2000 mm) zapewniającej podgląd procesu obróbki z trzech stron (okna z pleksi), wewnątrz której wilgotność i temperatura stabilizowane są przy pomocy bezobsługowego klimatyzatora. Wewnątrz obudowy zainstalowano także dwie lampy LED-owe, dzięki czemu uzyskano niezbędny poziom oświetlenia obrabiarki przy minimalnej ilości wydzielanego ciepła.

Dopełnieniem konstrukcji mikrofrezarki jest osprzęt stanowiący część opisywanego systemu diagnostycznego. Dobór elementów składowych tego systemu został poparty szczegółową analizą literatury specjalistycznej, w efekcie czego powstał system monitorujący stan pracy obrabiarki na wielu płaszczyznach. Poza standardowymi pomiarami prądów pobieranych przez elektrowrzeciono oraz serwonapędy dokonywane są także pomiary wibroakustyczne przy pomocy specjalistycznych mikrofonów, pomiary sił i przyspieszeń w trzech kierunkach oraz pomiary temperatury w wybranych punktach przy pomocy miniaturowych czujników termoparowych.

Poza odpowiednim doбором sygnałów pomiarowych bardzo ważne jest także określenie, gdzie zostaną umieszczone czujniki pomiarowe oraz w jaki sposób będą one mocowane. Trójosiowy siłomierz został tak zamontowany, aby móc bezpośrednio dokonywać pomiarów sił procesu obróbki pochodzących od narzędzia. W tym celu umieszczono go na serwonapędzie osi Y, a bezpośrednio do niego umocowany jest obrabiany przedmiot. Miejsce, w którym dokonano montażu miniaturowych czujników przyspieszeń, również ma wpływ na jakość i wyniki pomiarów. Zdecydowano się na zamontowanie ich na korpusie elektrowrzeciona przy pomocy specjalnego kleju. Otrzymujemy dzięki temu konfigurowalność ich umiejscowienia, w przypadku gdy okaże się, że miejsce zamocowania nie jest optymalne. Mikrofony umieszczono na statywach przymocowanych do stojaka, na którym stoi obrabiarka. Statywy umożliwiają uzyskanie dowolnej konfiguracji kątowej, jak i odległości położenia mikrofonów od obrabianego przedmiotu.

Sercem całego systemu diagnostycznego jest sterownik z wbudowanym układem FPGA pracujący pod kontrolą syste-



Rys. 1. Schemat ideowy przedstawiający zaprojektowany system diagnostyczny procesu mikroobróbki

mu czasu rzeczywistego, który poza akwizycją i obróbką danych pobieranych ze wszystkich czujników ma za zadanie wypracować odpowiednie korekty prędkości posuwu osi, a także prędkości obrotowej elektrowrzeciona. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych algorytmów diagnostycznych możliwa jest natychmiastowa reakcja na wystąpienie stanów nieodpowiednich i wypracowanie działań optymalizujących sterowanie, zapewniając tym samym utrzymanie żądanej jakości obróbki. Dzięki zastosowaniu tak działającego systemu diagnostycznego zbudowano urządzenie nie tylko zapewniające uzyskanie znacznie lepszej jakości obróbki (większa dokładność i powtarzalność pomimo zużywania się mikrofrezu), ale także zmniejszenie liczby sytuacji prowadzących do katastrofalnego zużycia mikrofrezu lub uszkodzenia obrabianego detalu.

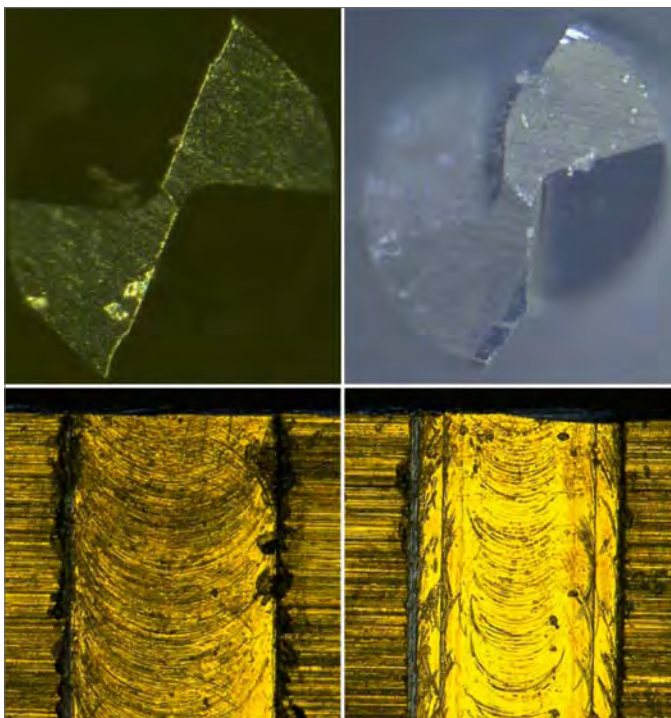
Na rys. 1 przedstawiono schemat zaprojektowanego systemu diagnostycznego procesu mikroobróbki.

### Wyniki pomiarów

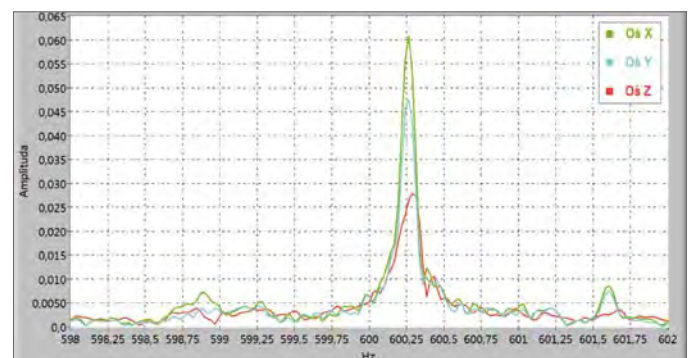
W celu przedstawienia działania zaprojektowanego systemu diagnostycznego przeprowadzono eksperyment obrazujący stopień zużycia frezu na stabilność drganiową procesu mikrofrezowania oraz na jakość obrabianej powierzchni.

Próbka ze stali 18G2 została poddana obróbce z użyciem frezu dwustrzowego o średnicy 0,61 mm (rys. 2). Frezowanie przeprowadzono przy następujących parametrach obróbki: posuw na ostrze  $f_z = 6 \mu\text{m}$ , głębokość skrawania  $a_p = 10 \mu\text{m}$ , prędkość obrotowa frezu  $n = 18\ 000$  obr./min).

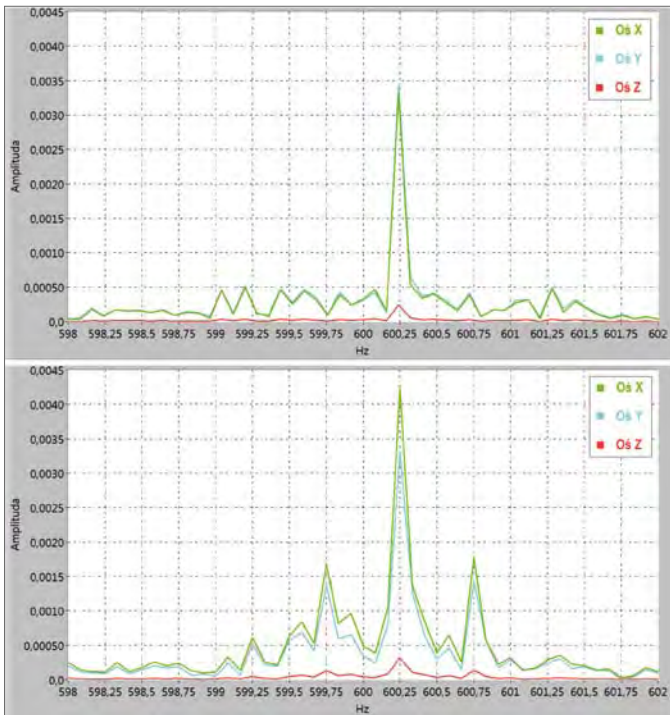
Wykonano kolejno pięć liniowych przebiegów roboczych przez całą długość próbki (4,3 mm), po czym zaobserwowano całkowite zniszczenie narzędzia. Przy wykorzystaniu cyfrowego mikroskopu (powiększenie 250-krotne) przedstawiono stan narzędzia oraz obrabianego przedmiotu po zakończonej obróbce (rys. 2). Z ilustracji wynika, iż wraz ze stopniem degradacji narzędzia pojawiają się nierówności, które swoje odzwierciedlenie mają także w zarejestrowanych sygnałach odczytywanych z czujników systemu diagnostycznego (rys. 4, 5).



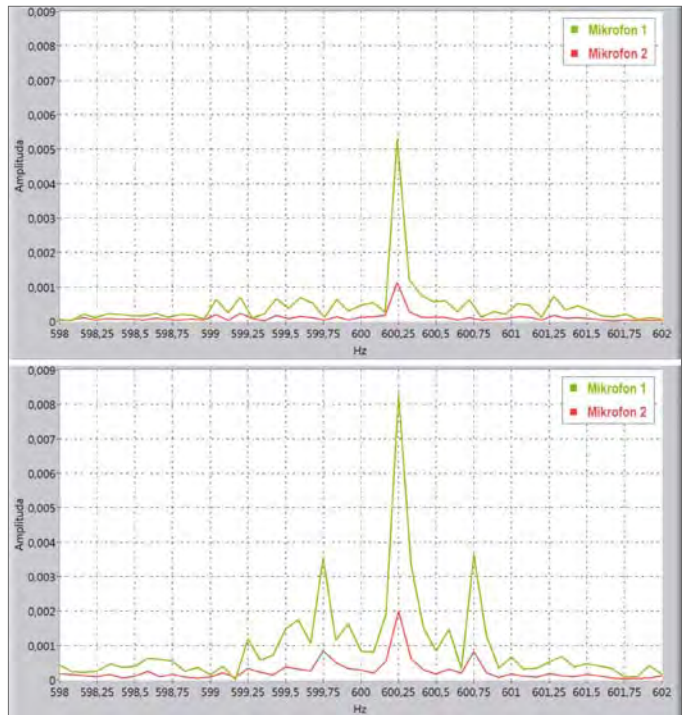
Rys. 2. Porównanie stanu powierzchni po frezowaniu narzędziem nowym (z lewej) oraz zużytym (z prawej)



Rys. 3. Widmo sił zarejestrowanych podczas skrawania



Rys. 4. Porównanie widma drgań mierzonych przy frezie nowym (górze) oraz uszkodzonym (dół)



Rys. 5. Porównanie widma pomiarów akustycznych mierzonych przy frezie nowym (górze) oraz uszkodzonym (dół)

Na rys. 3, 4 i 5 przedstawiono – uzyskane w wyniku zastosowania FFT – częstotliwościowe widmo mocy sygnałów odczytywanych podczas obróbki z czujników systemu diagnostycznego.

Na rys. 4 i 5 wyraźnie widać, że główna składowa widma odpowiada częstotliwości obrotowej elektrowrzeciona (ok. 600 Hz) i jest ona składową dominującą w przedstawianych spektrach. Obserwowany wraz ze stopniem degradacji narzędzia coraz większy udział pozostałych częstotliwości ukazuje, jak bardzo negatywny wpływ mają niepożądane drgania na jakość obróbki. Na tej podstawie system diagnostyczny potrafi zidentyfikować problem stopniowo niszczącego się frezu, zanim mikrofrezarka zakończy proces obróbki, co pozwala na wyeliminowanie wad produkcyjnych.

### Podsumowanie – kierunki dalszych badań

Podsumowując, otrzymane eksperymentalnie wyniki potwierdzają obrany kierunek rozwoju, dając jednocześnie podstawy do wyznaczania nowych kierunków w diagnostyce.

Dalsze badania będą polegały na znalezieniu korelacji pomiędzy parametrami obróbki, tzn. posuwem na ostrze, głębokością skrawania, prędkością obrotową wrzeciona i stanem zużycia narzędzia, a jakością powierzchni obrobionej w zależności od właściwości i wymiarów obrabianego materiału.

### Literatura

- [1] SHANG-LIANG CHEN, Y.W. JEN: *Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) 381–400.
- [2] PAUL W. PRICKETT, RAEES A. SIDDIQUI, ROGER I. GROSVENOR: *The development of an end-milling process depth of cut monitoring system*, Int J Adv Manuf Technol (2011) 52: 89–100.
- [3] WEIWU ZHONG, DONGBIAO ZHAO, XI WANG: *A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on*

*vibration signals*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 1057–1064.

- [4] IULIAN MARINESCU, DRAGOS AXINTE: *A time-frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 53–65.
- [5] XIAOLI LI: *Real-time Detection of the Breakage of Small Diameter Drills with Wavelet Transform*, Int J Adv Manuf Technol (1998) 14: 539–543.
- [6] P. Y. SEVILLA-CAMACHO, G. HERRERA-RUIZ, J. B. ROBLES-OCAMPO, J. C. JAUREGUI-CORREA: *Tool breakage detection in CNC high-speed milling based in feed-motor current signals*, Int J Adv Manuf Technol (2011) 53: 1141–1148.

dr inż. Bogdan Broel-Plater jest adiunktem w Katedrze Automatyki Przemysłowej i Robotyki Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Specjalizuje się w projektowaniu algorytmów wykorzystywanych w układach ze sterownikami programowalnymi (PLC) oraz w praktycznych zastosowaniach logiki rozmytej (sterowanie ruchem jednostek pływających, automatyzacja przetwórstwa tworzyw sztucznych, algorytmy sterowania serwonapędów cyfrowych);

mgr inż. Paweł Waszczuk jest doktorantem KAPiR WE ZUT w Szczecinie. Jego głównym obszarem zainteresowań są zagadnienia związane z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów w zastosowaniach do diagnostyki procesów obróbki skrawaniem oraz mikroobrobki;

mgr inż. Artur Kobyłkiewicz jest doktorantem w KAPiR WE ZUT w Szczecinie. Obszarem jego zainteresowań badawczych są algorytmy predykcyjne ułamkowego rzędu w zastosowaniu do sterowania w układach mechatronicznych oraz szeroko pojęta teoria chaosu w układach dynamicznych