

Stanisław CIECIAK<sup>1</sup>  
Krzysztof KARBOWSKI<sup>2</sup>

## **NADZOROWANIE PROCESU WIERCENIA GŁĘBOKICH OTWORÓW**

Artykuł zawiera omówienie stosowanych w praktyce układów nadzorowania procesu wiercenia głębokich otworów oraz metod nadzorowania opisanych w literaturze. Ponadto przedstawiono propozycję układu nadzorowania procesu głębokiego wiercenia, którego celem jest sterowanie procesem obróbkowym na podstawie informacji o zjawiskach fizykalnych zachodzących w strefie skrawania. Układ ten będzie realizowany w projektowanej obrabiarce do wiercenia głębokich otworów.

### **1. WSTĘP**

Wiercenie głębokich otworów, czyli otworów, których długość jest co najmniej dziesięć razy większa od średnicy, niesie ze sobą szereg problemów. Są one związane z utrudnionym doprowadzaniem chłodziwa do strefy obróbki oraz usuwaniem wiórów z otworu. Proces głębokiego wiercenia odróżnia również od zwykłego wiercenia niebezpieczeństwo wystąpienia znacznych błędów wykonania otworów, spowodowanych zastosowaniem narzędzi o niewielkiej sztywności. W przypadku tego typu narzędzi niezrównoważenie sił działających na krawędzie skrawające wiertła, spowodowane między innymi ich zużyciem lub zmianami w strukturze materiału obrabianego, ma istotny wpływ na prostoliniowość wykonywanego otworu. Zastosowanie układu nadzorowania procesu wiercenia głębokich otworów daje możliwość poprawy jakości technologicznej wykonanych otworów.

W artykule opisano wybrane układy nadzorowania procesu wiercenia głębokich otworów, opisane w literaturze naukowej oraz stosowane w warunkach przemysłowych. Przedstawiono również propozycję układu nadzorowania, który zostanie zastosowany w projektowanej obrabiarce do wiercenia głębokich otworów.

### **2. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ OPISANYCH W LITERATURZE NAUKOWEJ**

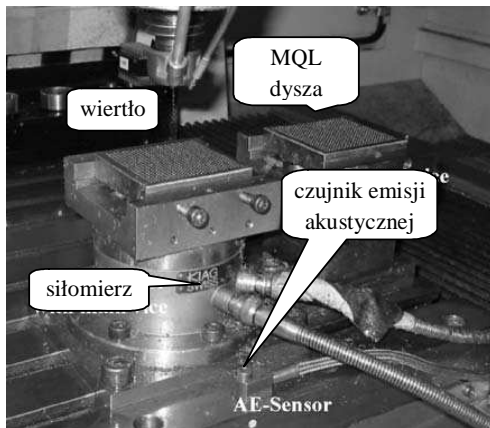
Heinemann i in. [3] opisują nadzorowanie zużycia wiertel o średnicy 1,5mm podczas wiercenia otworów o głębokości 15mm, poprzez pomiar siły i momentu skrawania oraz

---

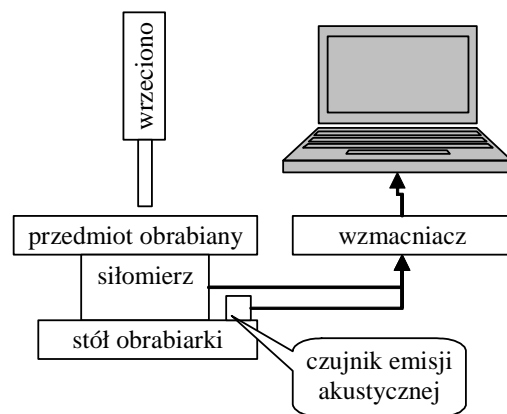
<sup>1</sup> Fabryka Obrabiarek Precyzyjnych „AVIA” Spółka Akcyjna

<sup>2</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

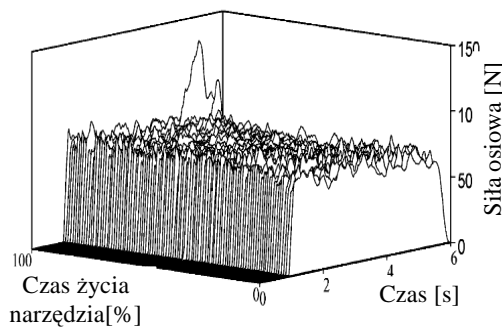
sygnału emisji akustycznej. Badania opisane w artykule były prowadzone na pionowym centrum frezarskim. Materiałem obrabianym była stal węglowa o zawartości węgla 0,45%. Podczas wiercenia rejestrowano siłę osiową oraz moment skrecający (rys.1-2), mierzone za pomocą piezoelektrycznego momentomierza firmy Kistler typu 9271A. Sygnał ten był filtrowany dolnoprzepustowo z progiem 30 Hz. Rejestrowano również sygnał emisji akustycznej czujnikiem typu 8152A1 firmy Kistler o zakresie pomiarowym czujnika 50-400kHz. W torze pomiarowym zastosowano konwerter uśredniający RMS – nie podano stałej integracyjnej przetwornika.



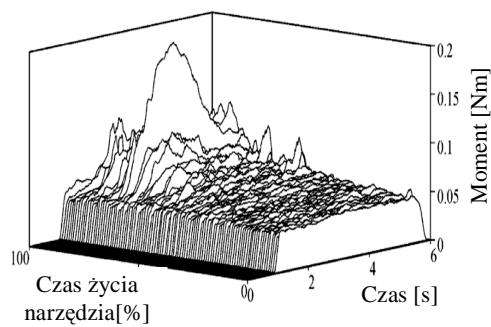
Rys. 1. Stanowisko badawcze [3]  
Fig. 1. Test setup for drilling tests [3]



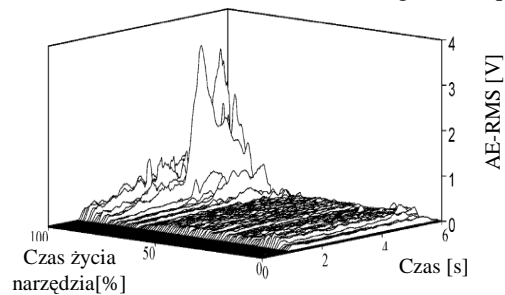
Rys. 2. Schemat toru pomiarowego [3]  
Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup



Rys. 3. Siła osiowa [3]  
Fig. 3. Thrust force [3]



Rys. 4. Moment skrecający [3]  
Fig. 4. Torque [3]



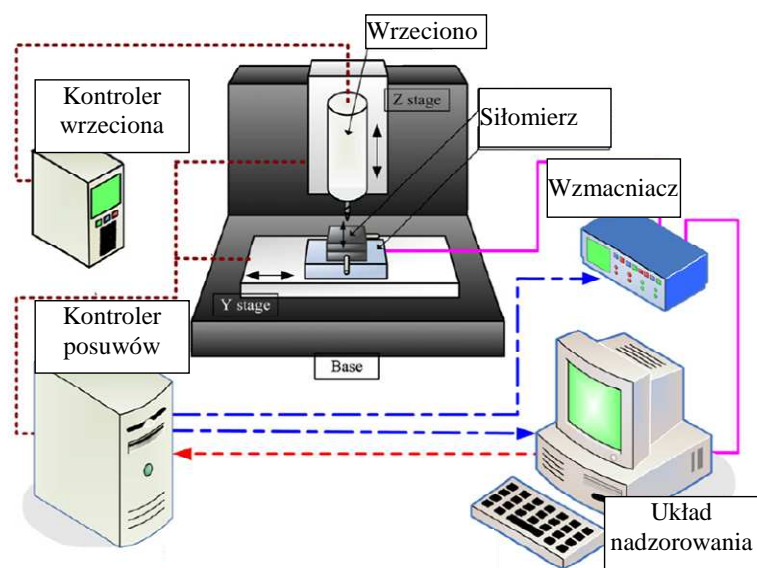
Rys. 5. Emisja akustyczna [3]  
Fig. 5. Acoustic emission [3]

Obróbkę wykonywano wiertłami niepokrywanymi ze stali szybko tnącej HSS oraz stali kobaltowej Co-HSS oraz wiertłami z powłokami TiN, TiAlN, TiCN, MoS<sub>2</sub>. Podczas badań zaobserwowano zmiany wartości sygnałów siły osiowej, momentu skręcającego oraz wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej zależne od stanu zużycia narzędzi (rys. 3-5).

Autorzy przedstawili następujące wnioski z przeprowadzonych badań:

- osiowa siła skrawania jest w niewielkim stopniu skorelowana ze stopniem zużycia (czasem pracy) narzędzia i nie jest to odpowiedni parametr do nadzorowania stanu zużycia wiertła;
- ogólny poziom wartości momentu skręcającego oraz wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ma tendencję do wzrostu pod koniec okresu trwałości narzędzia;
- sygnały momentu skręcającego oraz wartości skutecznej emisji akustycznej mogą być wykorzystywane do nadzorowania procesu wiercenia głębokich otworów.

Kim i in. [5] opisują system nadzorowania procesu wiercenia głębokich mikrootworów (o średnicy 0,25mm). Celem proponowanego w tej publikacji układu nadzorowania jest zwiększenie okresu trwałości wiertła. W tym celu prowadzony jest pomiar osiowej siły wiercenia. Ponadto wiertło jest cyklicznie wycofywane z otworu, w celu usunięcia wiórów (rys. 6).

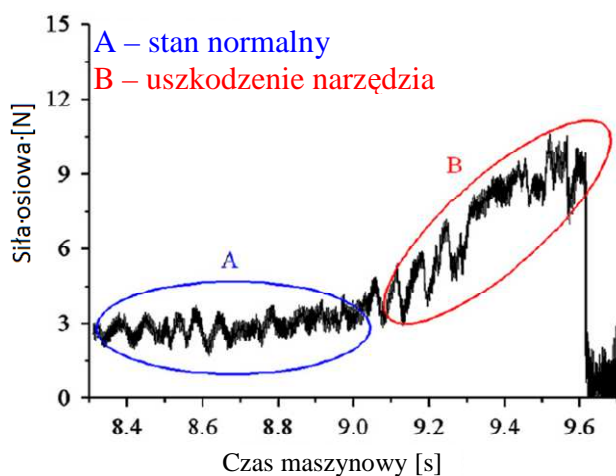


Rys. 6. Schemat układu nadzorowania [5]

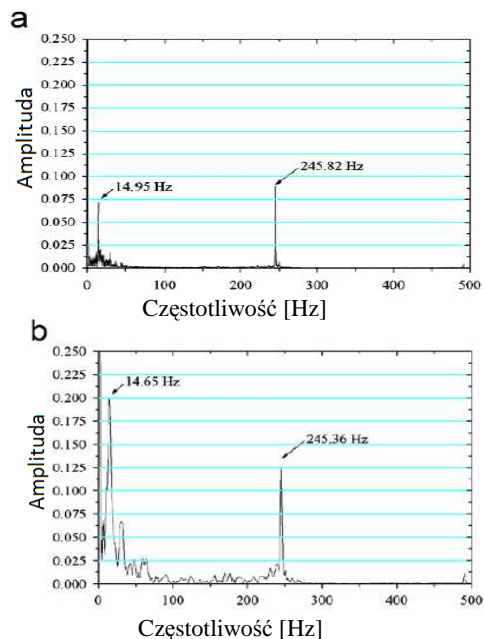
Fig. 6. Schematic diagram of the micro-drilling system [5]

Przebiegi zmian wartości siły osiowej analizowane są w dziedzinach czasu (rys. 7) i częstotliwości (rys. 8).

Analiza przebiegów wartości siły osiowej pozwoliła autorom na opracowanie układu nadzorowania procesu wiercenia. Układ zapobiega uszkodzeniom wiertła, poprzez odpowiednio wczesne wycofanie narzędzia z otworu. Autorzy piszą we wnioskach, iż przed zastosowaniem układu nadzorowania niezwykle często występowały uszkodzenia wiertła – układ nadzorowania wyeliminował je niemal całkowicie.



Rys. 7. Siła osiowa bez wycofywania wiertła:  
A – stan normalny; B – uszkodzenie narzędzia [5]  
Fig. 7. Thrust force without peck drilling  
A – normal state; B- prior to drill breakage [5]



Rys. 8. Siła osiowa bez wycofywania wiertła:  
a – stan normalny; b – uszkodzenie narzędzia [5]  
Fig. 8. Thrust force without peck drilling:  
a – normal state; b- prior to drill breakage [5]

Rehorn i in. [6] przedstawiają przegląd literatury, dotyczącej metod nadzorowania procesów wytwarzania. W szczególności dokonują podziału układów ze względu na wykorzystywane sygnały pomiarowe. Podobne zagadnienia porusza Jantunen [4], skupiając swoją uwagę na procesie wiercenia.

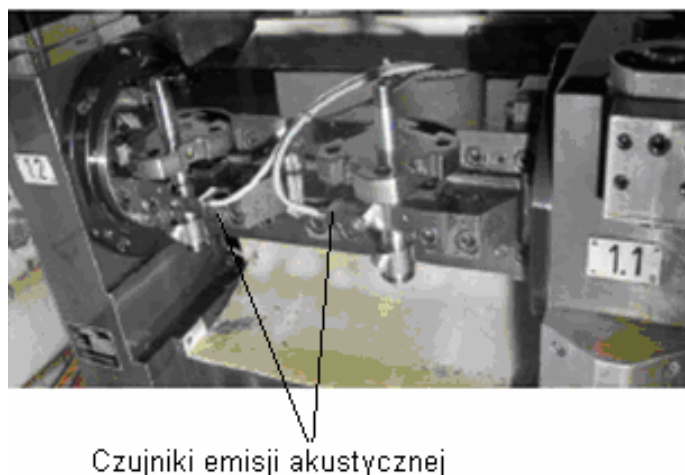
Bierman i in. [1] dokonują wnikliwej analizy procesu wiercenia głębokich otworów za pomocą wiertel trepanacyjnych. Zastosowanie wiertel trepanacyjnych do wiercenia głębokich otworów opisują również Gao i in. [2].

### 3. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ STOSOWANYCH W PRZEMYSŁE

Zastosowanie określonych systemów nadzoru narzędzia podczas procesu głębokiego wiercenia wynika głównie z czynników ekonomicznych, to znaczy kosztów samego narzędzia, kosztów materiału obrabianego oraz seryjności obróbki. W przypadku, gdy koszty narzędzia oraz materiału obrabianego są niskie, wówczas nie stosuje się systemów nadzoru samego procesu wiercenia, lecz stosuje się bardzo proste systemy kontroli samego narzędzia, np. poprzez stykowy pomiar narzędzia po każdym procesie wiercenia (firma Middelex-Electronic GmbH).

Seryjność produkcji warunkuje czas jaki można poświęcić procesowi „dopasowania systemu nadzoru narzędzia” do konkretnego procesu wiercenia. I tak w przypadku produkcji małoseryjnej sam proces „dopasowania” musi być krótki i prosty, tak aby mógł wykonać go operator obrabiarki. W przypadku produkcji wielkoseryjnej sam proces optymalizacji systemu nadzoru może trwać znacznie dłużej i jest z reguły bardziej

skomplikowany. Ponadto jest przeważnie wykonywany wspólnie przez dostawcę systemów nadzoru i inżynierów użytkownika. Przykładem takiego rozwiązania jest wdrożony w 1997 roku w zakładach produkcyjnych firmy Bosch w Bamberg, wspólnie przez firmę Artis oraz Bosch, system nadzoru głębokiego wiercenia otworów w elementach silnika do samochodów osobowych [7]. Do nadzoru procesu wiercenia został zastosowany system monitorowania narzędzi CTM firmy Artis. Na każdym stanowisku wiercenia został zainstalowany czujnik emisji akustycznej (rys.9).



Rys. 9. Czujnik emisji akustycznej w układzie nadzorowania [7]  
Fig. 9. Acoustic emission sensor in the monitoring system [7]

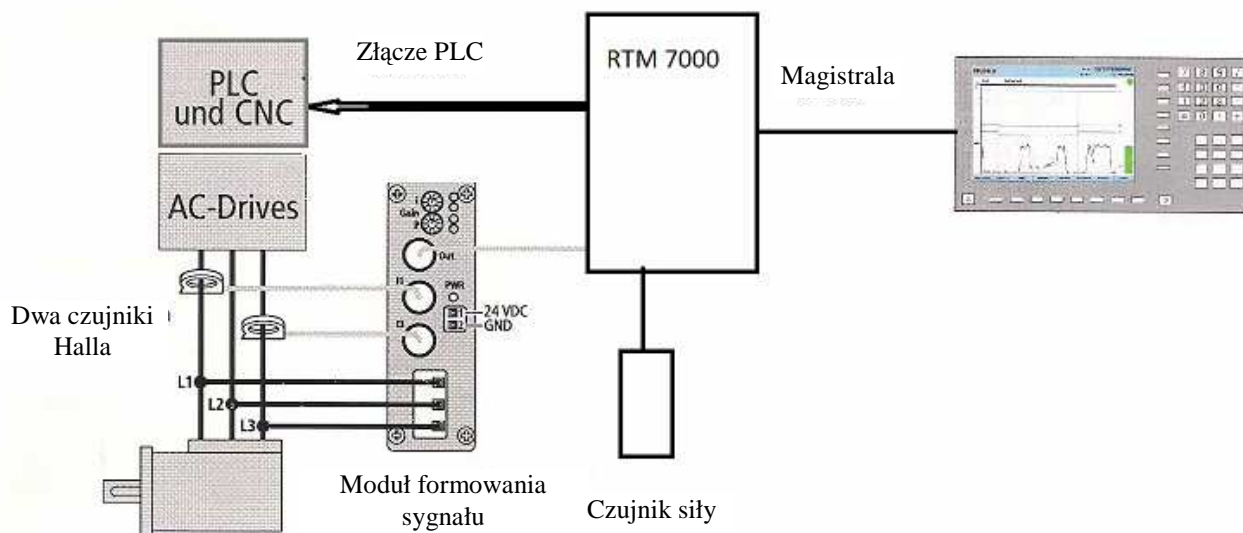
Podczas opracowywania strategii nadzorowania, proces obróbki był badany przez wizualizację systemu CTM przy wyłączonych sygnałach wyjściowych. Jednocześnie każdorazowo moment pojawienia się sygnału alarmowego był porównywany z faktycznym stanem wiertła po obróbce. Na tej podstawie określono poziom i czas trwania sygnału, a ich przekroczenie oznacza uszkodzenie lub stopień narzędzia. Pozwoliło to firmie Artis wiarygodnie wykryć uszkodzenie lub stopień narzędzia. Alarmy są aktywowane tylko wówczas, gdy narzędzie jest uszkodzone lub zbliża się do granicy zużycia.

System nadzorowania CTM firmy Artis składa się z następujących elementów:

- czujniki emisji akustycznej AE-C,
- przetwornik pomiarowy KU-4,
- moduł główny CTM,
- panel operatora.

Dla nadzoru procesu głębokiego wiercenia wiertłami lufowymi w przypadku produkcji małoseryjnej firma PROMETEC [8] oferuje system nadzoru narzędzia PROMOS 2 oparty na pomiarze rzeczywistej mocy na wrzecionie oraz pomiarze siły osiowej (rys. 10). Pomiar mocy odbywa się poprzez dwa czujniki Halla HC 200 C. Sygnały z czujników Halla przekazywane są poprzez moduł formowania sygnału ETP 20 do modułu RTM (Real Time Monitor). Również sygnały z piezoelektrycznego jednoosiowego czujnika siły, zamontowanego pomiędzy obsadą a nakrętką przekładni kulowo-tocznej osi, w której

odbywa się wiercenie przekazywane są do modułu RTM. W module RTM następuje porównanie sygnałów monitorowanych z ustalonymi wartościami granicznymi i na tej podstawie do sterowania są przekazywane odpowiednie sygnały alarmowe.



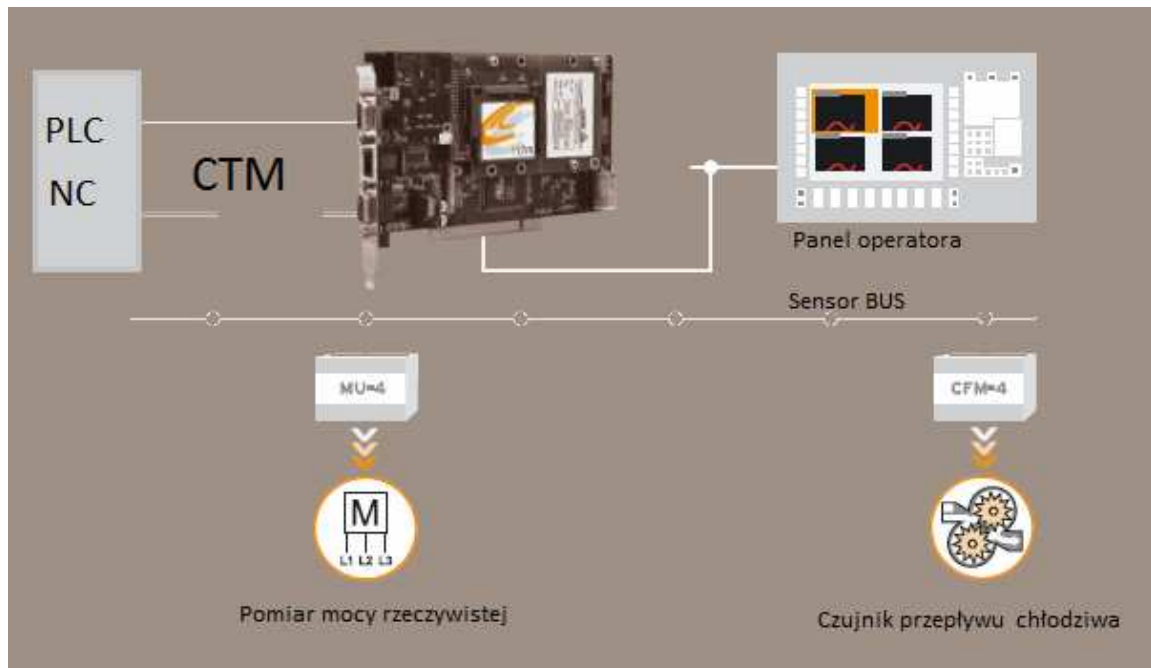
Rys. 10. Schemat układu nadzorowania PROMOS 2 firmy PROMETEC [8]  
 Fig. 10. Schema of PROMOS 2 monitoring system made by PROMETEC [8]

Według doświadczeń firmy PROMETEC zdobytych podczas instalacji systemów nadzoru narzędzia w procesie głębokiego wiercenia, sam pomiar mocy na wrzecionie nie daje pełnej informacji na temat stanu zużycia narzędzia, szczególnie w przypadku wiercenia wiertłami lufowymi. Dodatkowy pomiar siły osiowej daje lepszy obraz stanu narzędzia, szczególnie w przypadku wiertel lufowych wielostrzowych, dzięki czemu uzyskuje się skuteczność na poziomie 85%.

Wartości graniczne ustala się na podstawie przebiegów uzyskanych podczas procesu „uczenia”. „Uczenie” przeprowadza się dla każdego procesu obróbki. Polega on na zbieraniu sygnałów z czujników pomiarowych podczas niezakłóconej obróbki. Proces ten jest bardzo prosty do przeprowadzenia i bez problemów może być wykonywany przez operatora obrabiarki.

Dla procesu wiercenia wiertłami lufowymi w produkcji małoseryjnej firma Artis oferuje system nadzoru narzędzia oparty na pomiarze mocy na wrzecionie oraz dodatkowo kontroli przepływu cieczy chłodzącej (rys. 11, 12) [9].

Pomiar mocy, podobnie jak w przypadku firmy PROMETEC, jest realizowany poprzez dwa czujniki Halla. Sygnały z czujników Halla uformowane w module MU-4 są przesyłane poprzez magistralę Sensor –BUS do modułu CTM. Podobnie sygnał z czujnika przepływu cieczy chłodzącej przekazywany jest do modułu CTM za pośrednictwem modułu CFM-4.



Rys. 11. Schemat układu nadzorowania CTM firmy Artis [9]  
 Fig. 11. Schema of monitoring system made by Artis [9]



Rys. 12. Wiertło lufowe  
 Fig. 12. The rifle drill

Zastosowanie czujnika pomiaru przepływu cieczy chłodzącej pozwala na dostarczenie informacji do modułu CTM o zmniejszeniu przepływu cieczy, na skutek zatkania otworów doprowadzających chłodziwo do ostrza wiertła lub kanałów odprowadzających wióry ze strefy obróbki. Sygnał ten wyprzedza informację o wzroście pobieranej mocy przez wrzeciono z czujników Halla i odpowiednio uwzględniony w strategii nadzoru pozwala na wczesne wygenerowanie alarmu do układu sterowania.

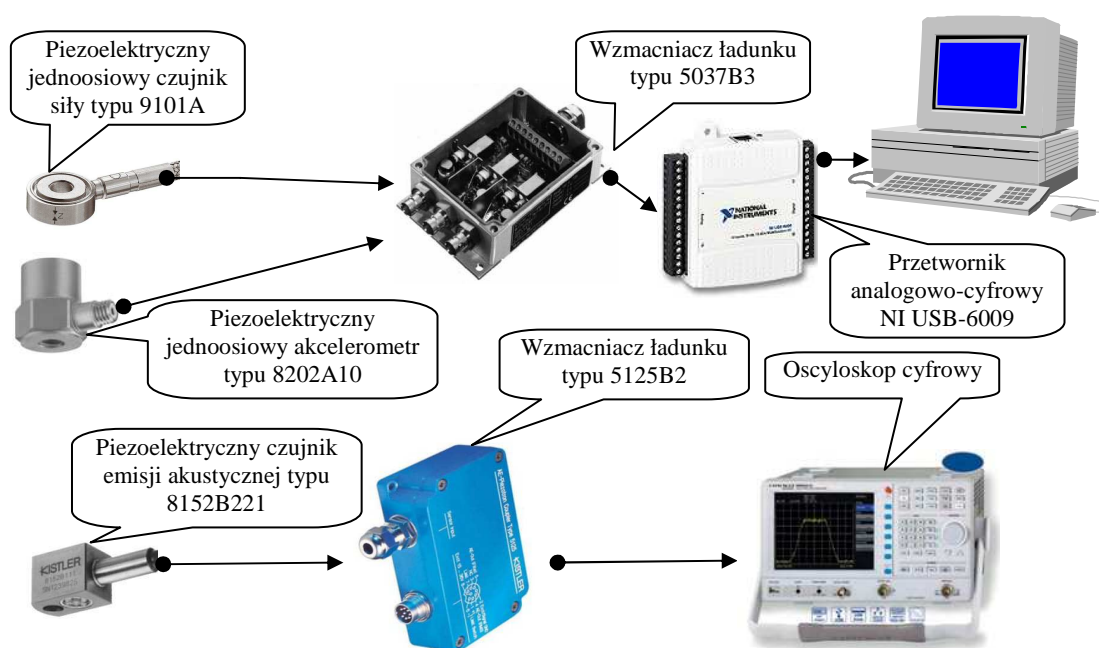
#### 4. PROJEKTOWANY UKŁAD NADZOROWANIA

Zaprojektowano układ nadzorowania procesu głębokiego wiercenia, którego celem jest sterowanie procesem obróbkowym na podstawie informacji o zjawiskach fizykalnych zachodzących w strefie skrawania. Informacje te można uzyskać poprzez pomiar sił działających na narzędzie oraz drgań układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie

(OUPN). W celach poznawczych autorzy proponują również pomiar wysokoczęstotliwościowej emisji akustycznej.

Układ pomiarowy tworzą (rys. 13, 14):

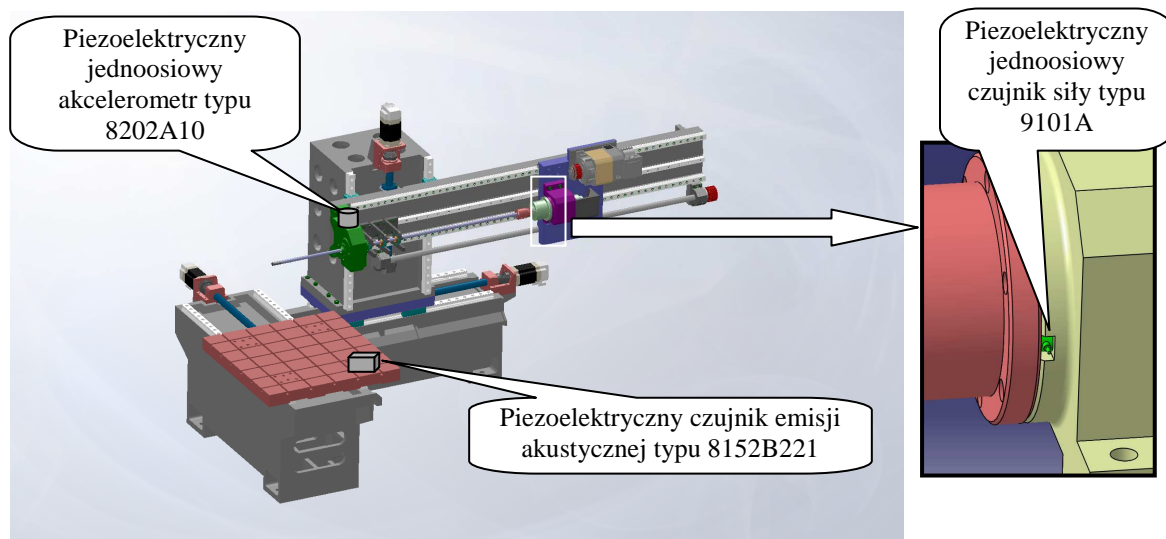
- jednoosiowy piezoelektryczny czujnik siły (prod. Kistler, typ 9101A) wraz z okablowaniem (prod. Kistler, typ 1939A3),
- jednoosiowy akcelerometr piezoelektryczny (prod. Kistler, typ 8202A10) wraz z okablowaniem (prod. Kistler, typ 1631C5),
- piezoelektryczny czujnik emisji akustycznej wraz z okablowaniem (prod. Kistler, typ 8152B221),
- wzmacniacze ładunku do czujników piezoelektrycznych (prod. Kistler, typ 5037B3 oraz 5125B2),
- wielokanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy (prod. National Instruments, typ NI USB-6009),
- stabilizowany zasilacz prądu stałego,
- komputer PC,
- oscyloskop cyfrowy.



Rys. 13. Schemat toru pomiarowego  
Fig. 13. Diagram of measurement track

Czujnik emisji akustycznej montowany jest z pomocą obejmę magnetycznej na powierzchni przedmiotu obrabianego lub na powierzchni uchwytu mocującego przedmiot. Akcelerometr montowany jest również za pomocą uchwytu magnetycznego. Miejscem jego zamontowania jest uchwyt prowadzący wiertło (podtrzymka), znajdujący się najbliżej przedmiotu obrabianego. Czujnik siły wymaga wykonania specjalnego gniazda, służącego





Rys. 14. Położenie czujników  
Fig. 14. Position of the sensors

do jego osadzenia pomiędzy wrzecionem a korpusem wiertarki. Czujnik ten pracuje w układzie „by-pass”, co oznacza, iż przenosi jedynie część całkowitej osiowej siły. Siłę przenoszoną przez czujnik określa się jako stosunek pola powierzchni czujnika do całkowitego pola powierzchni styku elementów przenoszących osiową siłę skrawania.

Oprogramowanie układu pomiarowego zostało wykonane przy użyciu systemu LabView.

## 5. WNIOSKI

Analiza literatury i stosowanych w praktyce układów nadzorowania procesu wiercenia głębokich otworów pokazuje, iż głównym celem monitoringu jest zabezpieczenie narzędzia przed zniszczeniem, będącym skutkiem zakleszczenia wiertła w otworze. Nadzorowanie zużycia ściernego jest dodatkowym zadaniem układu. Również w układzie zaprojektowanym przez autorów pomiar siły osiowej ma na celu rozpoznanie sytuacji, w której należy wycofać wiertło w celu usunięcia wiórów. Pomiar pozostałych sygnałów posłuży do oszacowania zużycia ściernego wiertła. Rozważana jest również możliwość zastosowania systemu wizyjnego, wykorzystującego metody analizy obrazów do oceny zużycia ściernego.

*Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu „Opracowanie i budowa wiertarki do wierceń głębokich WCZ-140 CNC z systemem automatycznego nadzoru procesu obróbki oraz wdrożenie jej do produkcji” (Nr projektu: III-030/P-039/2010), finansowanego przez MNiSW.*

## LITERATURA

- [1] BIERMANN D., KERSTING M., KESSLER N., *Process adapted structure optimization of deep hole drilling tools*, 2009, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58/1, 89–92.
- [2] GAO C.H., CHENG K., KIRKWOOD D., 2000, *The investigation on the machining process of BTA deep hole drilling*, Journal of Materials Processing Technology, 107/1, 222–227.
- [3] HEINEMANN R., HINDUJA S., BARROW G., 2007, *Use of process signals for tool wear progression sensing in drilling small deep holes*, Int J Adv Manuf Technol, 33/3-4, 243–250.
- [4] JANTUNEN E., 2002, *A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42/9, 997–1010.
- [5] KIM D. W., LEE Y.S., PARK M.S., CHU C.N., 2009, *Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49/3-4, 246–255.
- [6] REHORN A. G., JIANG J., ORBAN P. E., 2005, *State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review*, Int J Adv Manuf Technol, 26/7-8, 693–710.
- [7] KLEIN L., RICHTER S., 2007, *Prozessüberwachung mit Körperschall optimiert das Bohren tiefer Löcher*, Maschinenmarkt, 8, 34-35.
- [8] *Modulares Process Monitor System PROMOS 2* – Materiały firmy PROMETEC.
- [9] *ARTIS\_CTM\_V5\_September\_2009\_D\_GB* – Materiały firmy ARTIS.

## MONITORING OF DEEP HOLE DRILLING

The paper contains discussion of the deep holes drilling process monitoring systems used in practical applications and monitoring methods described in literature. Moreover a proposal of deep drilling monitoring system has been presented which aim is control of machining process basing on physical phenomena information on appearing in a cutting zone. The system will be realized in machine tool for deep drilling to be designed.