

Stanisław CIECIAK*
Krzysztof KARBOWSKI**

NADZOROWANIE PROCESU WIERCENIA GŁĘBOKICH OTWORÓW

W artykule scharakteryzowano proces wiercenia głębokich otworów oraz omówiono, stosowane w przemyśle oraz opisane w literaturze, metody nadzorowania procesu. Zaprezentowano również układ nadzorowania, który zostanie zamontowany 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

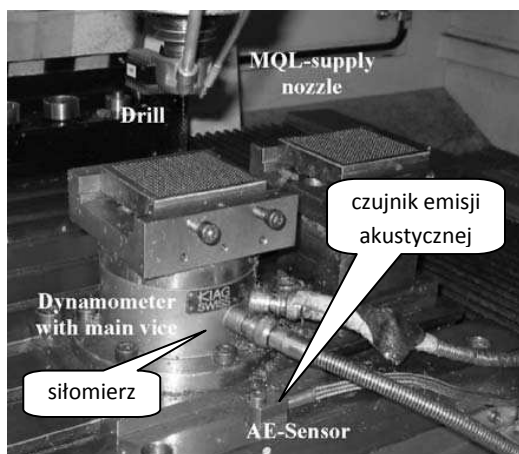
Heinemann i in. [3] opisują nadzorowanie zużycia wiertel o średnicy 1,5 mm podczas wiercenia otworów o głębokości 15 mm, poprzez pomiar siły i momentu skrawania oraz sygnału emisji akustycznej.

* Fabryka Obrabiarek Precyzyjnych „AVIA” Spółka Akcyjna

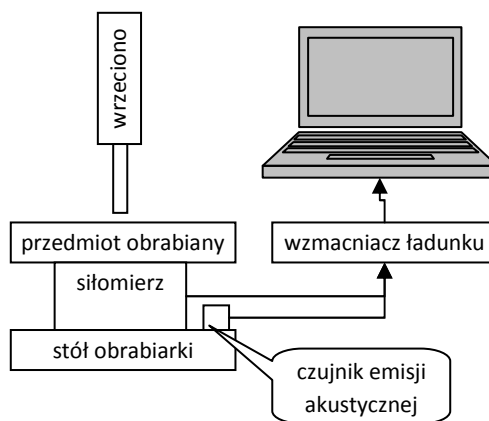
** Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji

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 skręcający (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 (czujnik typu 8152A1 firmy Kistler; zakres pomiarowy czujnika 50-400 kHz). W torze pomiarowym zastosowano konwerter uśredniający RMS – nie podano stałej integracyjnej przetwornika.

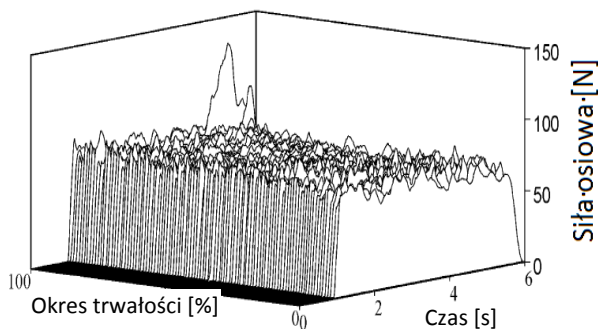
Obróbkę wykonywano wiertłami ze stali szybko tnącej (HSS) oraz stali kobaltowej (Co-HSS) niepokrywanymi oraz z powłokami TiN, TiAlN, TiCN, MoS₂.



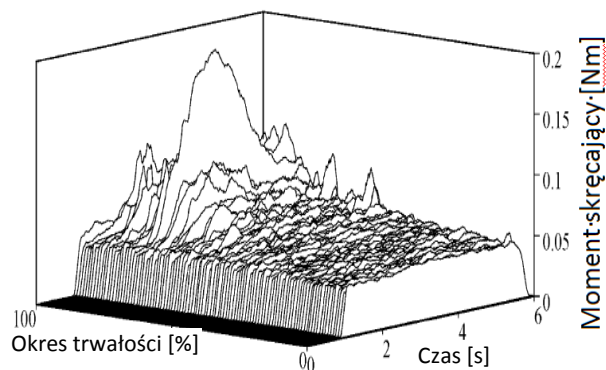
Rys.1. Stanowisko badawcze [3]
Fig.1. Test setup for drilling tests [3]



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

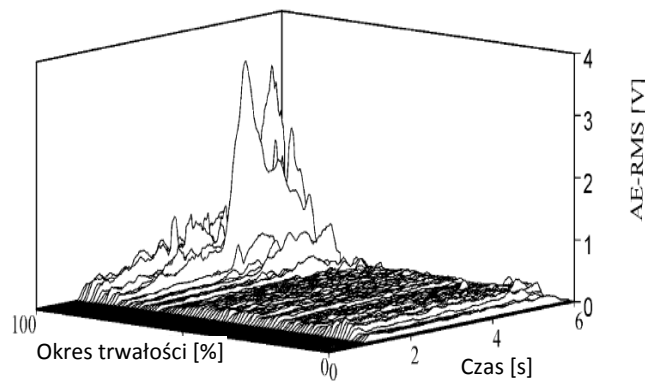


Rys.3. Siła osiowa [3]
Fig.3. Thrust force [3]



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

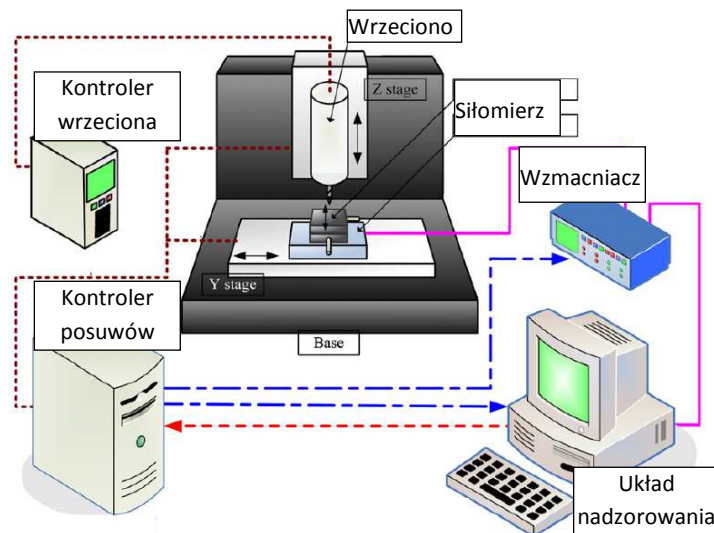
Podczas badań zaobserwowano zmiany wartości sygnałów siły osiowej, momentu skręcającego oraz wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej zależne od stanu zużycia narzędzi (rys.3-5).



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

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.



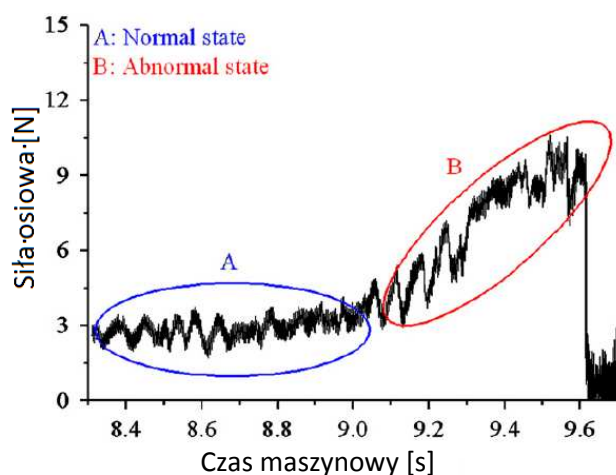
Rys.6. Schemat układu nadzorowania [5] (
Fig.6. Schematic diagram of the micro-drilling system [5]

Kim i in. [5] opisują system nadzorowania procesu wiercenia głębokich – jak to określają – mikrootworów (w rzeczywistości są to otwory wykonywane wiertłami o średnicy 0,25 mm). Celem układu nadzorowania jest zwiększenie okresu trwałości

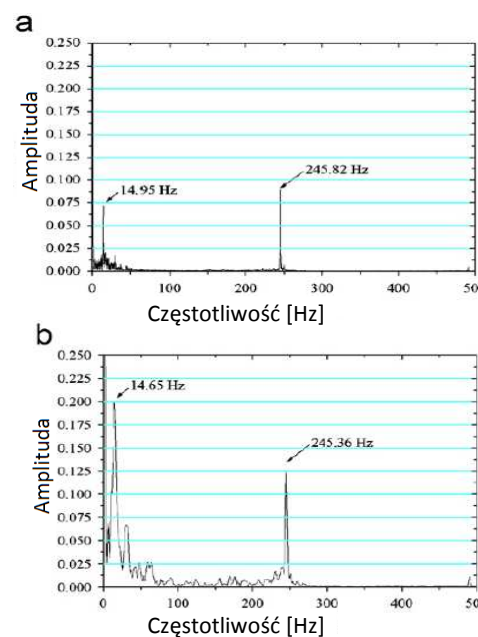
wiertła. W tym celu prowadzony jest pomiar osiowej siły wiercenia. Ponadto wiertło jest cyklicznie wycofywane z otworu, w celu usunięcia wiórów (rys.6).

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 [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 wiertła trepanacyjnych. Zastosowanie wiertła 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 Middex-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).



Czujniki emisji akustycznej

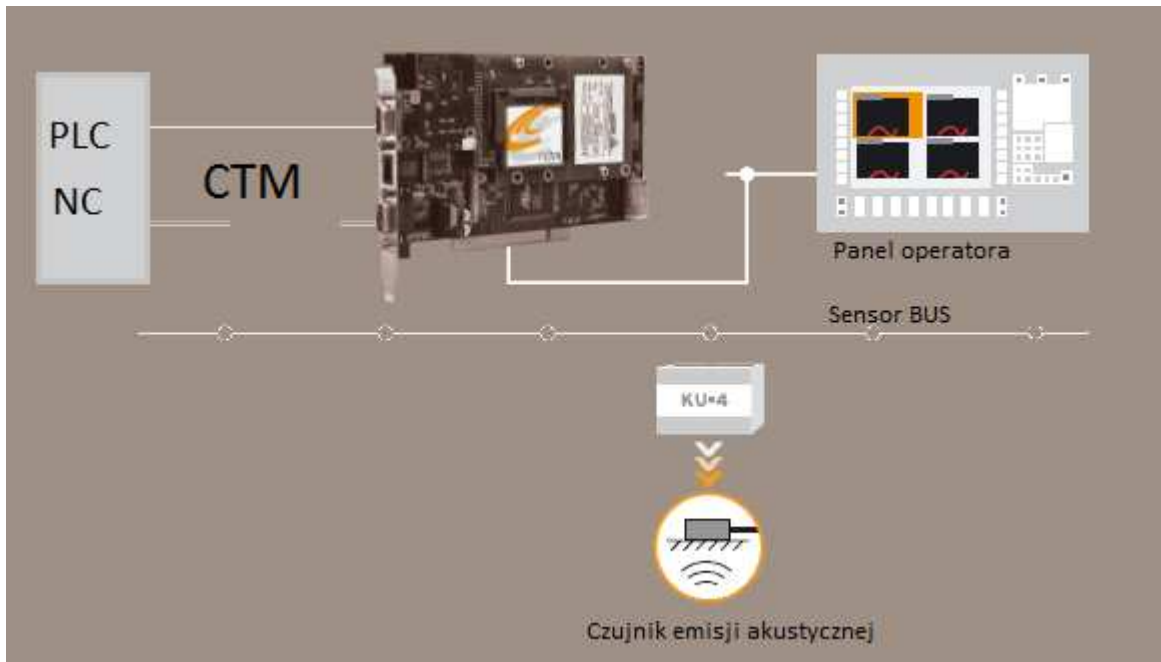
Rys.9. Czujnik emisji akustycznej w układzie nadzorowania [7]
Fig.9. Acoustic emission sensor in the monitoring system [7]

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, których 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.

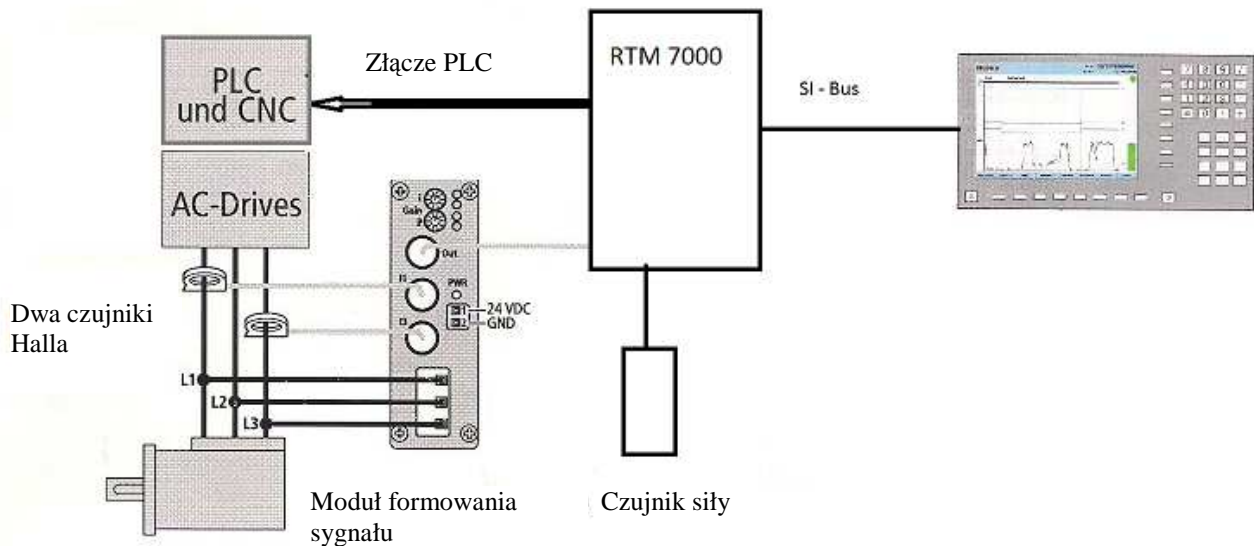
System nadzorowania CTM firmy Artis składa się z następujących elementów (rys.10):

1. czujniki emisji akustycznej AE-C;
2. przetwornik pomiarowy KU-4;

3. moduł główny CTM;
4. panel operatora.



Rys.10. Schemat układu nadzorowania CTM firmy Artis [9]
 Fig.10. Schema of monitoring system made by Artis [9]



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

Dla nadzoru procesu głębokiego wiercenia wiertłami lufowymi w przypadku produkcji małoseryjnej firma PROMETEC [8] oferuje system nadzoru narzędzia

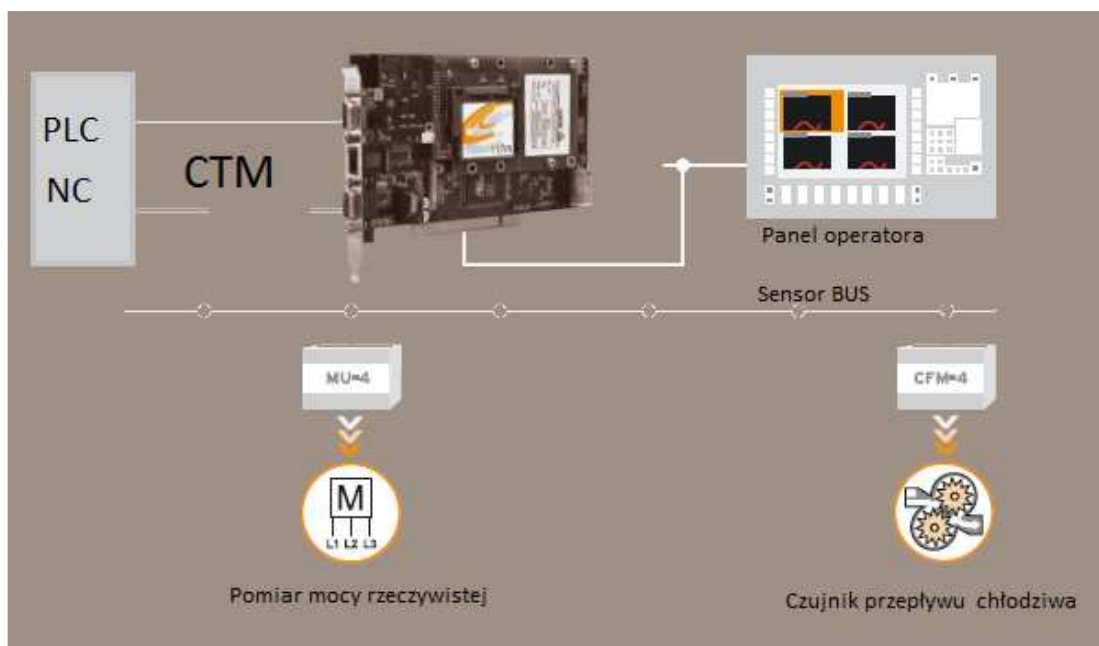
PROMOS 2 oparty na pomiarze rzeczywistej mocy na wrzecionie oraz pomiarze siły osiowej (rys.11).

Pomiar mocy odbywa się poprzez dwa czujniki Halla HC 200 C. Sygnały z czujników Halla przekazywana 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 limitami i na tej podstawie do sterowania są przekazywane odpowiednie sygnały alarmowe.

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%.

Limity 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 przy 100% parametrach. 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, rys.12)[9].



Rys.11. Schemat układu nadzorowania CTM firmy Artis [9]
Fig.11. Schema of monitoring system made by Artis [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 Sensor –BUS do modułu CTM. Również sygnał z czujnika przepływu cieczy chłodzącej jest, poprzez Sensor-Bus, przekazywany do modułu CTM.



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

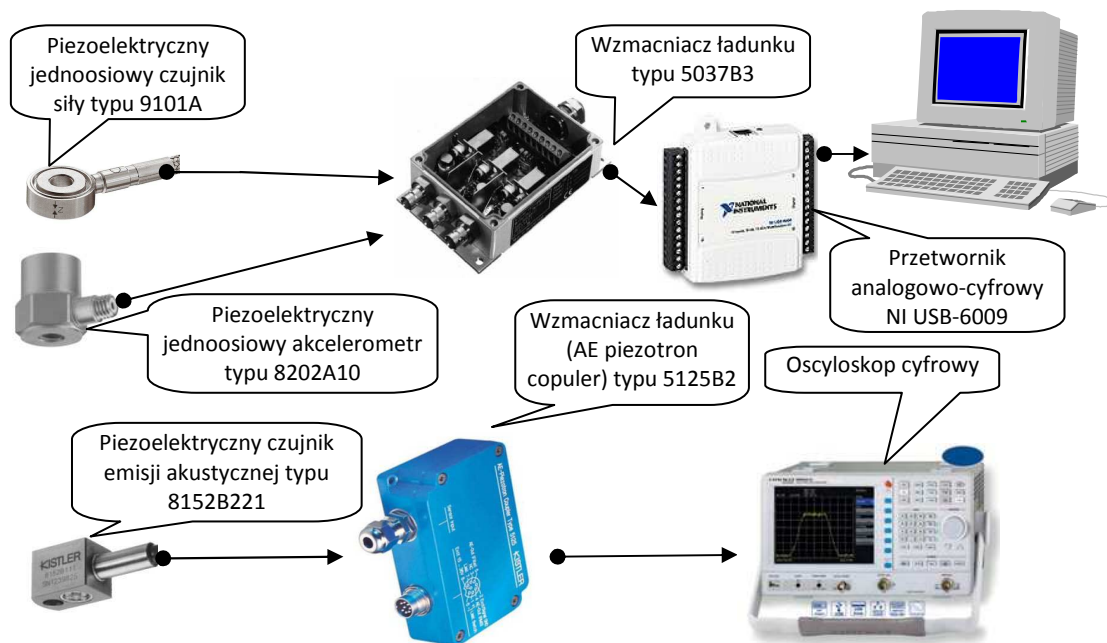
Zastosowanie czujnika pomiaru przepływu cieczy chłodzącej pozwala na dostarczenie informacji do modułu CTM o zmniejszeniu przepływu cieczy, na skutek zatkania otworów doprowadzających chłodziwo do ostrza wiertła lub kanałów odprowadzających wióry ze strefy obróbki. Sygnał ten wyprzedza informację o wzroście 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

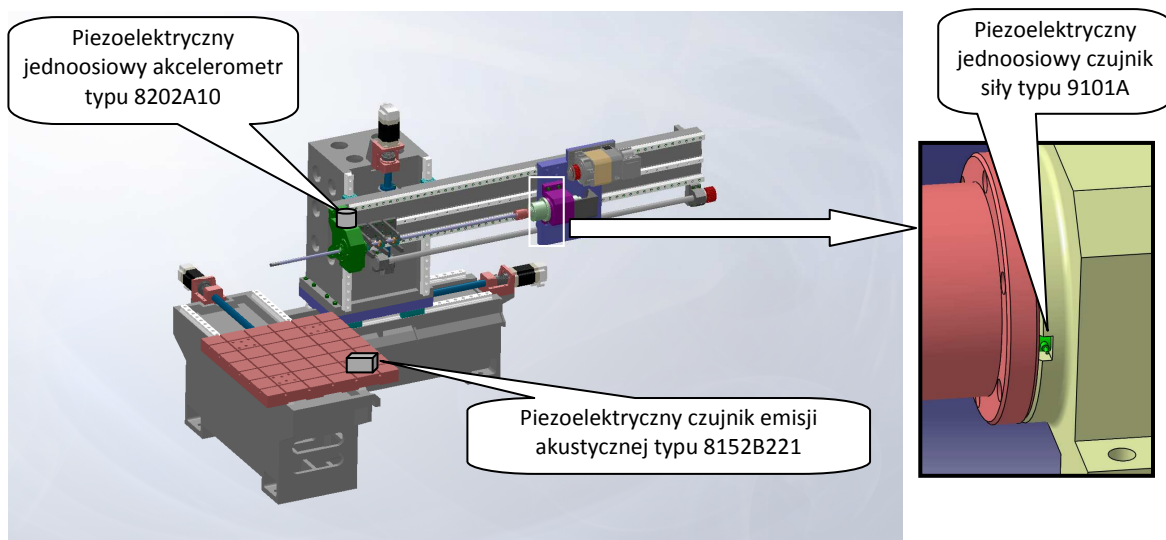
Autorzy zaprojektowali układ nadzorowania procesu głębokiego wiercenia, który sterowałby procesem obróbkowym na podstawie informacji o zjawiskach fizykalnych zachodzących w strefie skrawania. Informacje te można uzyskać poprzez pomiar sił działających na narzędzie oraz drgań układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie (OUPN). W celach poznawczych autorzy proponują również pomiar wysokoczęstotliwościowej emisji akustycznej.

Układ pomiarowy składa się z następujących elementów (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. Schematic diagram of the monitoring system



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

Czujnik emisji akustycznej montowany jest z pomocą obejmy magnetycznej na powierzchni przedmiotu obrabianego lub na powierzchni uchwyty mocującego przedmiot.

Akcelerometr montowany jest również za pomocą uchwyty magnetycznego. Miejszem jego zamontowania jest uchwyt prowadzący wiertło (podtrzymka), znajdujący się najbliżej przedmiotu obrabianego.

Czujnik siły wymaga wykonania specjalnego gniazda, służącego do jego osadzenia pomiędzy wrzecionem a korpusem wiertarki. Czujnik ten pracuje w układzie „by-pass”, co oznacza iż przenosi jedynie część całkowitej osiowej siły skrawania. 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*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 89–92
2. Gao C.H., Cheng K., Kirkwood D., *The investigation on the machining process of BTA deep hole drilling*, Journal of Materials Processing Technology 107 (2000) 222–227
3. Heinemann R., Hinduja S., Barrow G., *Use of process signals for tool wear progression sensing in drilling small deep holes*, Int J Adv Manuf Technol (2007) 33: 243–250
4. Jantunen E., *A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 997–1010
5. Kim D. W., Lee Y.S., Park M.S., Chu C.N., *Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49(2009) 246–255
6. Rehorn A. G., Jiang J., Orban P. E., *State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review*, Int J Adv Manuf Technol (2005) 26: 693–710
7. Klein L., Richter S.: *Prozessüberwachung mit Körperschall optimiert das Bohren tiefer Löcher*, Maschinenmarkt, 2007, nr 8, s. 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 describes the deep hole drilling process. The monitoring methods, which have been presented in the scientific literature or applied in industry, have been discussed. The original monitoring system, which will be mounted in the designed deep drilling machine tool, has been presented.