

**Marek GALEWSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## System kontrolno-pomiarowo-symulacyjny czasu rzeczywistego do badań metod aktywnej redukcji drgań

Dr inż. Marek GALEWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej (2003). Stopień doktora uzyskał na Wydziale Mechanicznym PG (2007), gdzie obecnie jest adiunktem w Katedrze Mechaniki i Mechatroniki. Działalność naukową skupia głównie na problematyce nadzorowania drgań obiektów dynamicznych, systemach pomiarowych oraz programowaniu w języku C/C++ i w LabView.



e-mail: [marg@mech.pg.gda.pl](mailto:marg@mech.pg.gda.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję, a następnie wybrane, kluczowe szczegóły budowy systemu kontrolno-pomiarowo-symulacyjnego czasu rzeczywistego. System ten znajduje zastosowanie w badaniach metod aktywnej redukcji drgań. Zamieszczono przykłady rezultatów badań obrazujące możliwości zastosowania systemu. Dzięki systemowi uzyskano również możliwość szybszego prototypowania algorytmów sterowania oraz obniżono koszty badań.

**Słowa kluczowe:** Programowanie w LabView, systemy czasu rzeczywistego, symulacje Hardware-in-the-Loop, redukcja drgań.

### Real time control, measurement and simulation system for active vibration control studies

#### Abstract

One of the important problems that may be encountered during milling operations are tool-workpiece relative vibrations [1]. There are many methods of their reduction, particularly including active ones [1-10]. In the paper, an idea of a real time control, measurement and simulation system utilised for studies on active vibration control is presented and its selected key elements are described. The system is based on the PXI platform and is programmed in LabView RT environment (Figs. 1, 2). The organisation of the main control loops in control programs is described in detail (Fig. 3). In order to generate a force acting on the plate, one or two piezoactuators are used (Fig. 4). They allow not only actively reducing but also exciting vibrations, which are used in Hardware-in-the-Loop (HIL) simulations. In this approach some parts of the controlled system (i.e. cutting process) are simulated, while the others are real (i.e. machined plate). This reduces the time of control law prototyping and testing significantly. It also reduces research costs as there is less need for performing experiments on a real milling centre. The presented system allows measuring vibrations, calculating a control signal for actuators and performing HIL simulations with the same hardware and software. The presented examples of the results obtained thanks to the system (Figs. 5-7) show its versatility and effectiveness. This confirms that the initial idea and chosen programming solutions are correct.

**Keywords:** LabView programming, real time system, Hardware-in-the-Loop simulations, vibration reduction.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych problemów napotykanym podczas frezowania przy wykorzystaniu obrabiarek są drgania układu obrabianka-uchwyt-przedmiot obrabiany-narzędzie skrawające [1]. Szczególnie ważną rolę odgrywają drgania względne układu narzędzie-przedmiot obrabiany, ponieważ ich występowanie może m.in. prowadzić do obniżenia jakości wykonania obrabianej powierzchni, a w skrajnych przypadkach nawet do uszkodzenia przedmiotu lub narzędzia. Wyzwaniem stanowią zwłaszcza frezowanie przedmiotów podatnych, których drgania łatwo jest wzbudzić [2].

Istnieje wiele metod redukcji drgań występujących podczas obróbki skrawaniem. Można wśród nich wyróżnić między innymi metody polegające na ingerencji w strukturę obrabiarki [1], sterowanie chwilowym położeniem narzędzia [3], dopasowanie prędkości obrotowej narzędzia do wybranych własności dynamicznych systemu [4], stosowanie zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona [5, 6] a także aktywne tłumienie drgań przedmiotu lub freza [7, 8].

W artykule przedstawiono koncepcję oraz kluczowe elementy systemu kontrolno-pomiarowo-symulacyjnego zbudowanego na użytek badań aktywnych metod redukcji drgań, a w szczególności – drgań występujących podczas frezowania.

## 2. Koncepcja systemu

Prowadzenie badań dotyczących aktywnego tłumienia drgań obrabiarek wymaga posiadania systemu pomiarowego, który będzie umożliwiał jednoczesne spełnienie kilku wymagań. Musi on umożliwiać przede wszystkim rejestrację danych oraz generowanie sygnału sterującego do elementów aktywnych. Specyfika realizacji badań wymaga instalacji systemu na różnych centrach obróbkowych, niekiedy w odległych geograficznie lokalizacjach, co wymusza zbudowanie systemu, który można łatwo transportować. Dodatkowo, stosunkowo wysokie koszty wynajęcia maszyn sprawiają, że badania na nich należy minimalizować. Zamiast nich konieczne jest zastosowanie innych narzędzi, w szczególności symulacyjnych. Jedną z technik symulacyjnych jaką można przy tym wykorzystać są symulacje w trybie *Hardware-in-the-Loop* (HIL) [7], w których część systemu jest rzeczywista, a część symulowana. Można przy tym użyć tego samego wyposażenia badawczego, co podczas pomiarów i sterowania. Zaletą tego podejścia jest możliwość prototypowania różnych algorytmów sterowania bezpośrednio w docelowym systemie kontrolno-pomiarowym. Ułatwia i przyspiesza to późniejszą ich weryfikację podczas badań na docelowym centrum obróbkowym.

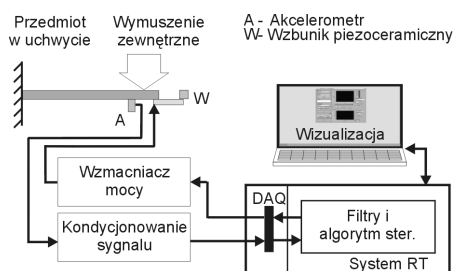
## 3. Kluczowe elementy systemu

W przedstawianym systemie źródłem sygnałów pomiarowych są akcelerometry mocowane do przedmiotu obrabianego, zaś sygnał sterujący podawany jest na wzbudnik piezoelektryczny generujący siłę oddziałującą na przedmiot. Na przedmiot mogą więc działać zarówno wymuszenia zewnętrzne (np. siły oddziaływania freza), jak i od wzbudnika lub wzbudników. Wzbudnik piezoelektryczny może więc być wykorzystany nie tylko do generowania sił mających na celu tłumienie drgań, ale także do wymuszenia tychże drgań, co znajduje zastosowanie podczas symulacji w trybie HIL.

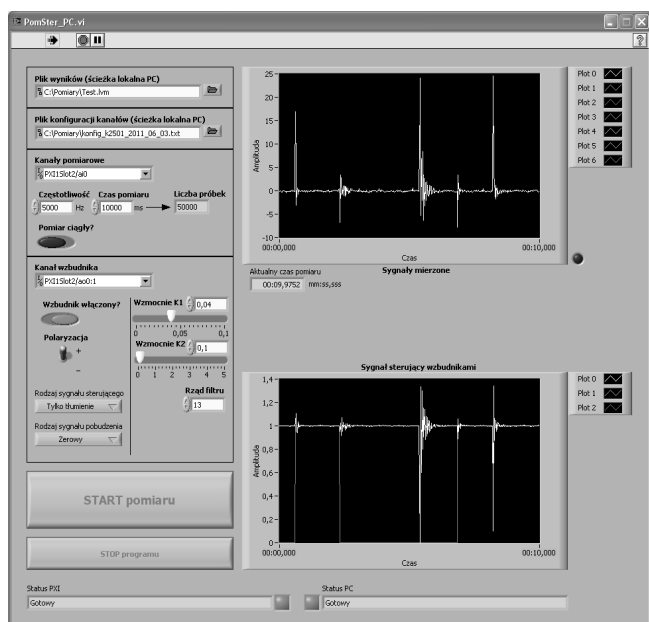
Głównym elementem systemu jest komputer przemysłowy w standardzie PXI, który wyposażony został w kartę przetworników A/C i C/A i działa pod kontrolą systemu LabView RealTime. Programowanie systemu odbywa się w środowisku LabView. Dodatkowo, do celów programowania oraz wizualizacji procesu pomiaru i sterowania wykorzystywany jest komputer PC połączony z komputerem PXI poprzez sieć ethernet. Schemat systemu pokazano na rys. 1.

Sterowanie systemem realizowane jest z wykorzystaniem dwóch aplikacji. Pierwsza z nich („A”) uruchomiona jest na komputerze PXI i odpowiedzialna jest za obsługę akwizycji danych (karty A/C), realizację algorytmu sterowania i wysłanie sygnału sterującego do karty C/A. Dodatkowo, program ten zapisuje wybrane sygnały do pliku binarnego na dysku lokalnym. Po zakończeniu pomiaru program ten również dokonuje konwersji utworzonego pliku binarnego na postać tekstową, bardziej przydatną do

dalszej analizy wyników. Drugi z programów („B”), którego interfejs pokazany jest na rys. 2, uruchomiony jest na komputerze PC i służy do konfiguracji pomiaru, sterowania pracą programu A oraz do bieżącej obserwacji przebiegu procesu. Dostępne z poziomu interfejsu programu B są m.in. takie ustawienia jak wybór kanałów wejściowych i wyjściowych i ich nastaw, wybór trybu działania (tylko pomiar, pomiar i tłumienie drgań, pomiar i symulacje HIL), ustawienie parametrów algorytmu sterującego, wybór rodzaju sygnału generowanego na potrzeby symulacji HIL, aktywacja wzbudników piezoelektrycznych.



Rys. 1. Schemat systemu  
Fig. 1. Diagram of the system



Rys. 2. Interfejs programu sterującego systemem  
Fig. 2. System control software interface

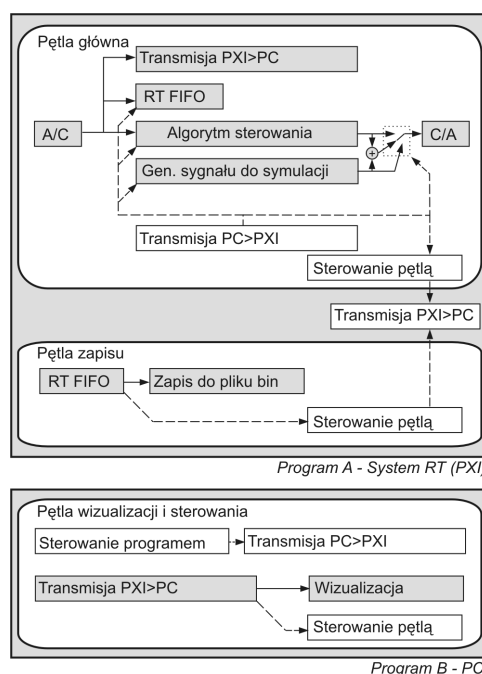
Zasadnicza część programu A podzielona jest na dwie pętle (rys. 3). Pętla główna realizuje:

- odczyt danych z karty A/C, które przekazywane są do: algorytmu sterowania, kolejki FIFO czasu rzeczywistego oraz wystawiane są w postaci zmiennej sieciowej
- obliczenie sygnału sterującego wzbudnikami zgodnie z wybranym algorytmem
- obliczenie zadanego sygnału sterującego wzbudnikami jeżeli wykorzystywany jest tryb symulacji HIL
- wybór sygnału podawanego na wzbudniki
- podanie sygnału sterującego do karty C/A

Poszczególne elementy sterowane są poleceniami przesyłanymi za pośrednictwem zmiennej sieciowej z programu B uruchomionego na komputerze PC. Niektóre z tych poleceń umieszczane są również w kolejce FIFO w celu przekazania ich do drugiej pętli programu. Druga z pętli odpowiedzialna jest za zapis danych umieszczonych w kolejce FIFO do pliku binarnego. Wykonanie

obu pętli taktowane jest sprzętowo, a źródłem sygnału taktującego jest zegar układu próbkującego z karty akwizycji danych.

Przedstawiona organizacja pętli programu sprawia, że ewentualne opóźnienia związane z zapisem danych do pliku nie wpływają na obsługę sygnałów wejściowych i wyjściowych. W normalnym trybie pracy pętla zapisu zapisuje próbki sygnałów z taką samą częstotliwością, z jaką są pobierane. W przypadku wystąpienia opóźnień niezapisane jeszcze próbki gromadzone są w kolejce FIFO, a pętla zapisu zaczyna być wykonywana z maksymalną częstotliwością. Dzięki temu może ona zapisać opóźnione dane szybciej niż normalnie. Po opróżnieniu kolejki częstotliwość wywołania pętli wraca do standardowej. Badania eksperymentalne wykazały, że w typowych sytuacjach opóźnienie zapisu może występować nawet kilka razy na sekundę i dotyczy zwykle do kilku tysięcy próbek. Po wykryciu opóźnienia program jest zwykle w stanie je nadrobić w czasie kilkudziesięciu milisekund.



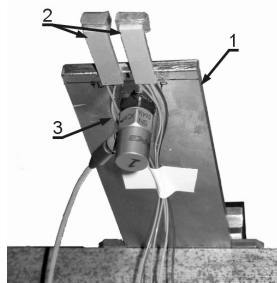
Rys. 3. Uproszczony schemat organizacji głównych pętli programów sterujących  
Fig. 3. Simplified organization diagram of the main loops in control programs

Sterowanie systemem odbywa się z poziomu programu B. Polecenia sterujące przekazywane są do programu A poprzez zmienne sieciowe. Jednocześnie w podobny sposób program A zwraca informacje o swoim stanie do programu B. Przykładowo, procedura zatrzymania pomiaru na polecenie użytkownika odbywa się następująco. Program B wysyła sygnał zatrzymania i rozpoczyna oczekiwanie na potwierdzenie zakończenia pomiaru i zapisu danych z programu A. Pętla główna programu A otrzymuje ten sygnał i przekazuje go do kolejki FIFO, po czym zatrzymuje się. Pętla zapisu odczytuje dane z kolejki FIFO aż do napotkania sygnału zatrzymania. Po zatrzymaniu obu pętli program A wysyła do programu B potwierdzenie zatrzymania, dzięki któremu program B może przejść do dalszych działań. Warto zauważyć, że może zaistnieć sytuacja, że polecenie zatrzymania zostanie wydane w chwili, gdy kolejka FIFO jest częściowo zapełniona. Zatrzymanie obu pętli programu A w takim momencie skutkowałoby utratą niezapisanych jeszcze danych. Przedstawiony sposób organizacji sterowania temu zapobiega. Pętla zapisu zatrzyma się dopiero po opróżnieniu kolejki FIFO.

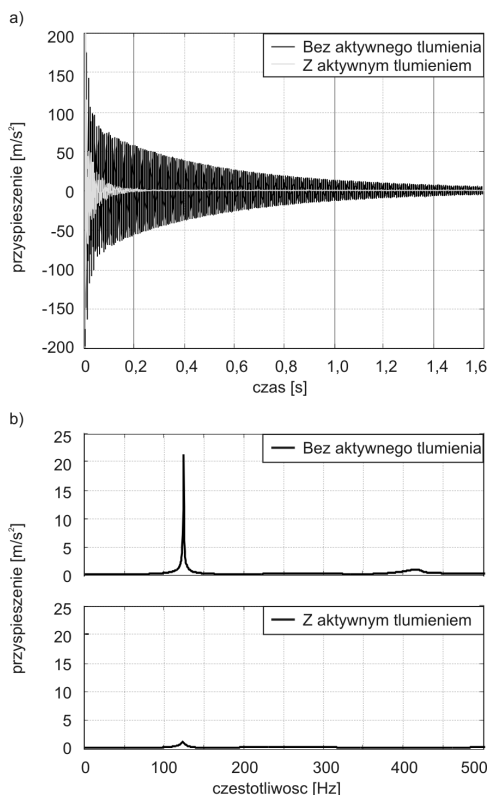
Po zakończeniu obu pętli program A przechodzi do procedury konwersji binarnego pliku danych do postaci tekstowej. Po jej zakończeniu oba pliki są automatycznie przesyłane do PC.

#### 4. Przykład wykorzystania systemu – aktywna redukcja drgań swobodnych

Jednym z najbardziej niebezpiecznych rodzajów drgań, jakie mogą wystąpić podczas frezowania, są drgania samowzbudne typu *chatter*. Jedną z cech charakterystycznych tych drgań jest ustalanie się ich częstotliwości blisko częstotliwości drgań własnych przedmiotu lub freza. Ponieważ drgania swobodne bardzo łatwo jest wzbudzić (np. uderzając badany przedmiot młotkiem modelarskim), a wywołanie drgań samowzbudnych wymaga wykonania testów bezpośrednio na frezarce, można wspomnianą bliskość częstotliwości obu drgań wykorzystać podczas testowania i wstępnego prototypowania algorytmów redukcji drgań. Jeżeli bowiem algorytm daje dobre rezultaty podczas tłumienia drgań swobodnych, powinien również działać poprawnie dla innych drgań o podobnych częstotliwościach.



Rys. 4. Widok próbki w uchwycie, 1) próbka, 2) wzbudniki, 3) akcelerometr  
Fig. 4. View of the plate in a holder, 1) plate, 2) piezoactuators, 3) accelerometer



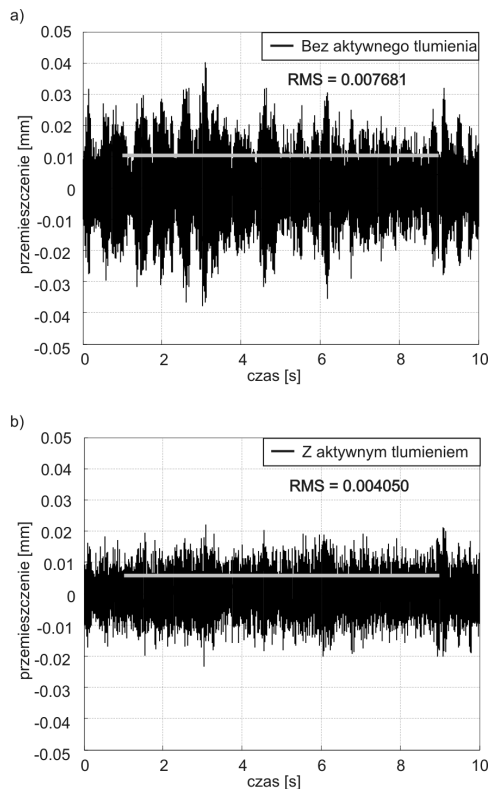
Rys. 5. Drgania własne próbki bez i z aktywnym tłumieniem, a) przebiegi czasowe przyspieszeń, b) widma amplitudowe przyspieszeń  
Fig. 5. Eigenvibration of the plate without and with active damping, a) time plot of acceleration, b) amplitude spectrum of acceleration

W prezentowanym przykładzie opisywany system wykorzystany został do badania aktywnego tłumienia drgań swobodnych płytki z brązu CC331G o wymiarach części swobodnej 140×50×5 mm. Przedmiot zamocowany był jednostronnie w uchwycie, a na jego swobodnym końcu przyklejone zostały dwa wzbudniki piezoelektryczne typu *bending plate* z dołączonymi dodatkowymi masami sejsmicznymi po 2,8 g każda (rys. 4). Sposób umieszczenia i mocowania wzbudników wynikał z braku możliwości ich przyklejenia np. na środku próbki, ponieważ docelowo miała być ona frezowana. Dodatkowe masy na końcach wzbudników pozwalały wygenerować odpowiednią siłę oddziałującą na próbkę. Oba wzbudniki pracowały synchronicznie i sterowane były identycznym sygnałem sterującym w celu zwiększenia poziomu generowanych sił. Algorytm sterujący realizował bezpośrednio sprzężenie od przyspieszenia [9] z tym, że dodatkowo sygnał pochodzący z akcelerometru był filtrowany filtrem FIR 15-go rzędu o częstotliwości odcięcia 300 Hz [10]. Zadaniem filtru było uzyskanie odpowiedniego kąta przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym oraz zmniejszenie czułości algorytmu sterowania na zakłócenia o wyższych częstotliwościach. Częstotliwość próbkowania wynosiła 5 kHz.

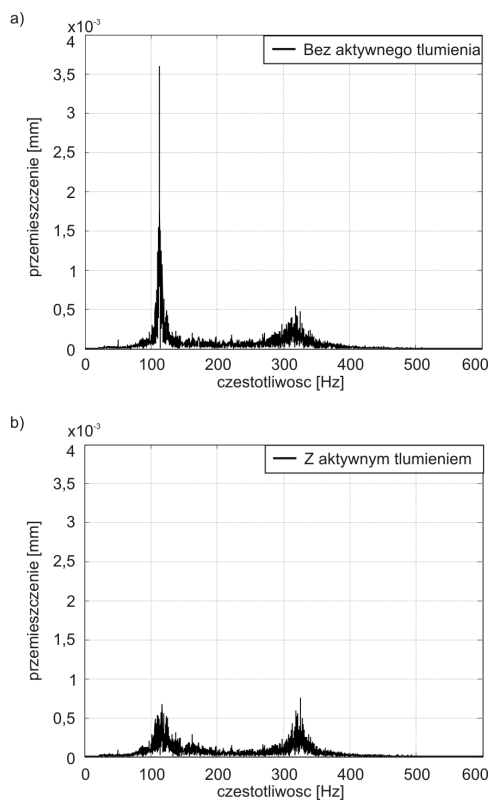
Identyfikacja parametrów modelu modalnego próbki wykazała, że drgania własne mają częstotliwość 124 Hz a bezwymiarowy współczynnik tłumienia  $\zeta = 0,00230$ . Szczyt widma amplitudowego dla zmierzonego fragmentu przebiegu czasowego przyspieszeń o długości 1,6 s wyniósł  $a_{max} = 20,859 \text{ m/s}^2$ . Po zastosowaniu aktywnego tłumienia drgań wartość współczynnika tłumienia wyniosła  $\zeta = 0,02703$  (blisko 12-krotny wzrost), zaś  $a_{max} = 1,066 \text{ m/s}^2$  (spadek blisko 20-krotny). Przebieg czasowy przyspieszeń dla przypadku z i bez aktywnego tłumienia drgań oraz ich widma amplitudowe pokazano na rys. 5. W obu przypadkach drgania były wymuszane pojedynczymi uderzeniami o identycznej sile.

#### 5. Przykład wykorzystania systemu – symulacje *Hardware-in-the-Loop*

Jak wspomniano wcześniej, wykonywanie badań na docelowym obiekcie może być związane z wysokimi kosztami. W takim przypadku warto zastosować techniki symulacyjne, a w szczególności technikę *HIL* gdzie część systemu jest symulowana, a część rzeczywista. Takie podejście zastosowano również podczas badań nad opisywanym algorytmem z bezpośrednim sprzężeniem od przyspieszeń, a celem symulacji było dobranie odpowiedniego zestawu filtrów cyfrowych w nim występujących. Symulacje były prowadzone dla płytki z zamocowanym wzbudnikiem, jednak pobudzenie, zamiast sił pochodzących z procesu skrawania, był arbitralnie zadawany sygnał podawany na wzbudniki. Jednocześnie, od tego sygnału odejmowany był sygnał wyznaczony przez algorytm sterowania. Obserwowano, czy dla danych nastaw filtrów uzyskiwane jest tłumienie drgań w obszarze częstotliwości drgań samowzbudnych oraz wymuszonych wirującym frezem, a także, czy nie powodują one wzbudzenia drgań w innych zakresach częstotliwości. Jako pobudzenie podawane były różne rodzaje sygnałów, np. sygnał złożony z wielu sygnałów harmonicznymi, o częstotliwościach obserwowanych wcześniej podczas badań eksperymentalnych oraz różne sygnały szumów, mające na celu pobudzenie próbki w szerszym zakresie częstotliwości. Jednym z takich sygnałów był szum biały przefiltrowany filtrem typu 1/f rzędu 2 o paśmie 350 Hz. Badana próbka była identyczna z opisaną w poprzednim przykładzie. Do sterowania wykorzystano również taki sam algorytm z tym, że sygnał wejściowy był filtrowany pasmowym filtrem Czebyszewa 2. rzędu o paśmie przepustowym w zakresie 95-125 Hz oraz, dodatkowo, dolnoprzepustowym filtrem FIR 15. rzędu o częstotliwości odcięcia 300 Hz.



Rys. 6. Przemieszczenia próbki pobudzonej sygnałem filtrowanego białego szumu a) bez i b) z aktywnym tłumieniem  
 Fig. 6. Displacements of the plate excited by the filtered white noise signal a) without and b) with active damping



Rys. 7. Widmo amplitudowe przemieszczeń próbki pobudzonej sygnałem filtrowanego białego szumu a) bez i b) z aktywnym tłumieniem  
 Fig. 7. Displacement amplitude spectrum of the plate excited by the filtered white noise signal a) without and b) with active damping

Na rys. 6 pokazano przebiegi przemieszczeń swobodnego końca próbki (wyznaczone na podstawie mierzonych przyspieszeń) dla przypadku bez i z aktywnym tłumieniem drgań. Widoczna jest blisko dwukrotna redukcja wartości skutecznej przemieszczeń dla przypadku z tłumieniem.

Na rys. 7. pokazano widma amplitudowe obu przebiegów, gdzie widoczne jest wyraźne obniżenie szczytu widma amplitudowego dla częstotliwości drgań własnych z  $a_{max} = 0,00360$  mm do  $a_{max} = 0,00068$  mm.

## 6. Wnioski

Opisany w artykule system kontrolno-pomiarowo-symulacyjny czasu rzeczywistego jest wykorzystywany do prowadzenia badań w Katedrze Mechaniki i Mechatroniki Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Wielokrotnie wykazał swoją dużą przydatność i uniwersalność, co potwierdza słuszność przyjętej koncepcji jego budowy oraz zastosowanych rozwiązań sprzętowych i programistycznych. Zaprezentowane przykłady obrazują wybrane możliwości zastosowania systemu, przy czym należy podkreślić, że zadania pomiarowe, aktywne sterowanie drganiami oraz prowadzenie symulacji HIL realizowane jest na tym samym sprzęcie i oprogramowaniu. Przyspiesza to prototypowanie algorytmów sterowania oraz obniża koszty badań.

Oprogramowanie i prace badawcze wykonane zostały w ramach projektu finansowanego przez MNiSW, grant nr. NN 503 147134.

## 7. Literatura

- [1] Tomków J.: Wibrostanilność obrabiarek. WNT, Warszawa 1997.
- [2] Kaliński K.: A novel method for vibration surveillance during high speed ball end milling of flexible details. Archives of Control Sciences 2007. Vol. 17 (53), no 3, 271–282.
- [3] Shiraishi M., Yamanaka K., Fujita H., Optimal Control of Chatter in Turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 31, no. 1, 1991, 31–43.
- [4] Liao Y. S., Young Y. C., A New On-line Spindle Speed Regulation Strategy for Chatter Control, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 35, no. 6, 1996, 651–660.
- [5] Kaliński K. J., Galewski M.: Chatter Vibration Surveillance by the Optimal-linear Spindle Speed Control. Mechanical Systems and Signal Processing 2011, Vol. 25, Issue 1, 383–399.
- [6] Soliman E., Ismail F.: Chatter suppression by adaptive speed modulation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 37, no. 3, 1997, 355–369.
- [7] Ganguli A., Deraemaekar A., Horodina M., Preumont A.: Active Damping of Chatter in Machine Tools – Demonstration With a “Hardware in the Loop” Simulator, Journal of Systems and Control Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 219, no. 15, 2005, 359–369.
- [8] Kim M. H., Won D., Ziegert J.: Numerical Analysis and Parameter Study of a Mechanical Damper for Use in Long Slender Endmills, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, 2006, 500–507.
- [9] Preumont A.: Vibration Control of Active Structures, An Introduction, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2002.
- [10] Kaliński K., Galewski M.: Active Damping of Impulse-Excited Flexible Plate Vibration, W: Projektowanie Mechatroniczne, Zagadnienia wybrane (Red. Uhl T.), AHG, Kraków, 2012 (w druku).

otrzymano / received: 27.02.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.09.2012

artykuł recenzowany / revised paper