

Andrzej ZBROWSKI, Jordan MEŻYK, Piotr CZAJKA

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

STRUKTURA UKŁADÓW REGULACJI W SYSTEMIE STEROWANIA MANIPULATOREM DO POZYCJONOWANIA MIKROFONU POMIAROWEGO W KOMORZE BEZECHOWEJ

Słowa kluczowe

Sterowanie napędami, manipulator, komora bezechowa, LabView.

Streszczenie

W artykule zaprezentowano strukturę układów regulacji w systemie sterowania napędami w manipulatorze przeznaczonym do pozycjonowania mikrofonu pomiarowego podczas badań w komorze bezechowej. Przedstawiono model geometryczny manipulatora oraz jego parametry elektromechaniczne. Przedyskutowano wymagania stawiane przed układem sterowania. Omówiono sposób współpracy układów wykonawczych z układem nadrzędnym. Przedstawiono wewnętrzną strukturę złożonych, wielopoziomowych układów regulatorów zabudowanych w użytych urządzeniach. Przedstawiono zasadę programowej kontroli mechanizmów manipulatora.

Wprowadzenie

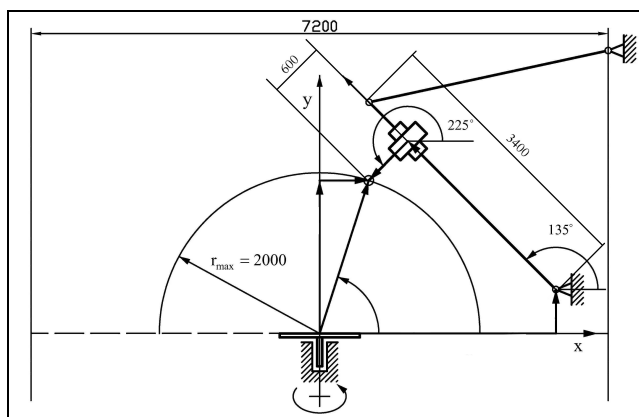
Badania prowadzone w komorach bezechowych i pogłosowych wymagają ogromnych nakładów pracy i czasu od osób prowadzących pomiary. Technika realizacji badań wiąże się z koniecznością pozycjonowania mikrofonu pomiarowego w wielu punktach przestrzeni pomiarowej. Tradycyjne badania są wykonywane przy wykorzystaniu przenośnych statywów do mocowania mikrofonów

pomiarowych, co znacznie komplikuje i wydłuża czas realizacji badań [5]. Ze względu na charakter zjawisk akustycznych automatyzacja procesów pomiarowych stanowi znaczące wyzwanie dla konstruktorów. Elementy konstrukcji instalowanych wewnątrz komór akustycznych zakłócają pole akustyczne powodując obniżenie jakości przeprowadzanych pomiarów. Jednak zysk polegający na znacznym uproszczeniu procedur pomiarowych oraz skróceniu czasu wymaganego do przeprowadzenia kompletnych badań zachęca do podejmowania prób automatyzacji pomiarów w komorach bezdechowych i pogłosowych.

Efektom zadania badawczego, zrealizowanego przez Akademię Górniczo-Hutniczą i Instytut Technologii Eksploatacji, jest system manipulatora do pozycjonowania mikrofonu pomiarowego w komorze bezdechowej. Prace przeprowadzono w ramach Programu Wieloletniego PW-004 pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”. Opracowany manipulator został wdrożony w komorze bezdechowej w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i jest wykorzystywany do zaawansowanych prac badawczych z zakresu pomiarów mocy akustycznej oraz rozkładu pola akustycznego obiektów i urządzeń.

1. Konstrukcja manipulatora

Manipulator składa się z dwóch elementów funkcjonalnych: stolika obrotowego do manipulowania obiektem badań oraz modułu skanującego X-Y do manipulowania obiektem pomiarowym [1]. Złożenie ruchu obrotowego stolika oraz ruchu w płaszczyźnie modułu XY pozwala na uzyskanie przestrzeni pomiarowej w kształcie półsfery, wymaganej w odpowiednich normach [3]. Geometria manipulatora (rys. 1) umożliwia realizację badań w półsferze pomiarowej o maksymalnym promieniu 2000 mm. Założenia projektowe oraz konstrukcja systemu jest omówiona dokładnie w [2].



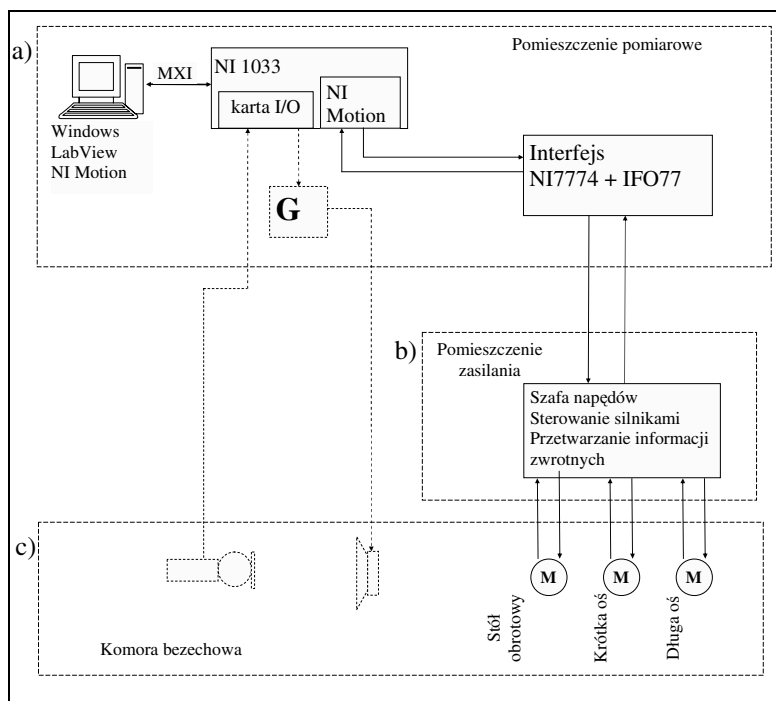
Rys. 1. Schemat systemu manipulatora do pozycjonowania mikrofonu pomiarowego w komorze bezdechowej

Napęd poszczególnych elementów manipulatora stanowią serwosilniki serii MSK firmy Bosch-Rexroth (tab. 1) zasilane z kompaktowych modułów mocy serii HCS. Wszystkie silniki wyposażone są w luzowniki aktywowane elektrycznie.

Tabela 1. Dane techniczne napędów

	Stół obrotowy	Krótką oś	Długa oś
Model	NR 750Z	PSK 60	CKR 12-90
Silnik	MSK 100	MSK 30	
Max. moment	102 Nm	4 Nm	
Moment trzymający luzownika	32 Nm	1 Nm	
Max moc zasilania	7 kW	2,1 kW	

Sterowanie manipulatorem odbywa się za pomocą systemu NI-Motion firmy National Instruments sprzęgniętego z komputerem typu PC. Ze względu na rozproszenie systemu manipulatora zastosowano dedykowany interfejs do izolacji galwanicznej przesyłanych sygnałów.



Rys. 2. Rozproszony system sterowania systemem manipulatora: a) pomieszczenie pomiarowe z komputerem, systemem NI-Motion oraz interfejsem, b) pomieszczenie zasilania z układami mocy, c) komora bezchowa z układami wykonawczymi

Układy wykonawcze manipulatora i systemu sterującego umieszczone są w trzech różnych pomieszczeniach w odległości kilkunastu metrów od siebie i rozmieszczone zgodnie z ich podstawowymi funkcjami (rys. 2). Układy wykonawcze (moduły liniowe, stół obrotowy, serwonapędy, wyłączniki krańcowe) umieszczone są w komorze bezechowej, układy mocy (zasilacze serwonapędów wraz z modułami sterującymi, zasilacze układów elektroniki) umieszczone są w pomieszczeniu za komorą, a pozostałe elementy sterujące (komputer, karty I/O, karta Motion oraz interfejsy) w pokoju pomiarowym [4].

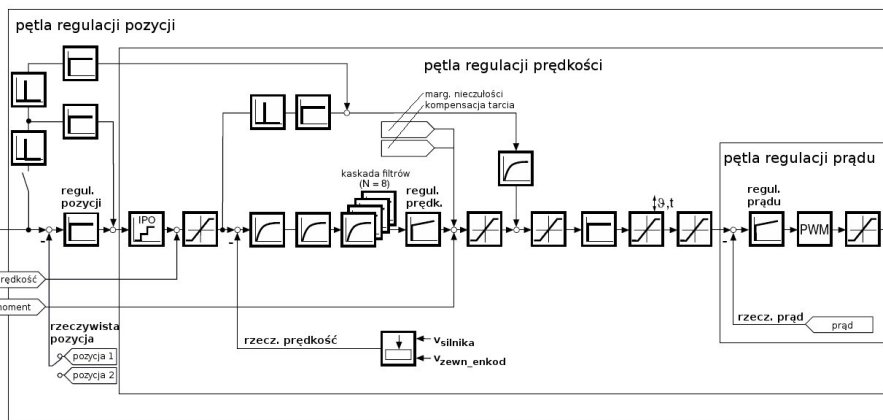
2. Współpraca napędów z komputerem

System manipulatora przeznaczony jest do prowadzenia szerokiego spektrum badań i dlatego wymagana jest duża elastyczność funkcyjna. Została ona zapewniona przez zastosowanie pakietu LabView jako oprogramowania nadrzędnego. Oprogramowanie współpracuje z systemem NI-Motion z zastosowaniem karty NI-7354. Karta ta ma dwa tryby pracy: tryb silnika krokowego oraz tryb sterowania serwonapędami za pomocą sygnału analogowego. Współpraca z napędami Bosch-Rexroth jest możliwa przy użyciu trybu analogowego. Napęd musi mieć w tym celu odpowiednią funkcjonalność, tj. moduł sterujący z interfejsem analogowym oraz emulację enkodera pozwalającą na zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego. W tym celu zastosowano moduł sterujący CSB Basic Analog z opcją emulacji enkodera EN2. Współpraca serwonapędów z układami nadrzędnymi poprzez wykorzystanie komunikacji analogowej może odbywać się w trybie sterowania prędkością lub momentem. W przypadku systemu manipulatora pomiarowego zastosowano tryb sterowania prędkością. Sterownik nadrzędny (karta Motion) wydaje polecenia definiujące wartości prędkości, natomiast z napędów otrzymywane są sygnały zwrotne, informujące o położeniu. Sterowanie prędkością napędów odbywa się za pośrednictwem napięciowych sygnałów analogowych ± 10 V generowanych za pośrednictwem karty Motion. Emulacja enkodera wewnątrz napędu zapewnia przekazywanie do karty sterującej informacji o rzeczywistym położeniu elementu wykonawczego. Zastosowany w napędach moduł emulacji enkodera generuje sygnał o parametrach zdefiniowanych przez użytkownika, który jest całkowicie niezależny od typu i rozdzielczości fizycznego enkodera.

Struktura systemu uwzględnia dwa niezależnie działające obwody zabezpieczające. Pierwszy z nich to układ załączający zasilanie napięciem trójfazowym tylko w przypadku gotowości wszystkich trzech napędów i odłączający to napięcie w przypadku nagłego braku gotowości któregoś z nich. Drugi obwód to układ wyłącznika awaryjnego. Wyłącznik ten znajduje się w komorze bezechowej w pobliżu układów wykonawczych i podłączony jest do funkcji E-Stop napędów oraz Inhibit All karty NI-Motion. Przycisk awaryjny powoduje bezpieczne zatrzymanie silników.

3. Struktura układu regulacji

Napęd IndraDrive firmy Bosch-Rexroth zawiera kompletny sterownik pracujący w zamkniętej, wielopoziomowej pętli sprzężenia zwrotnego (rys. 3). W układach z serwomechanizmami wydzielić można trzy formalne rodzaje regulacji – regulację położenia ze sprzężeniem od położenia, regulację prędkości ze sprzężeniem od prędkości oraz regulację momentu ze sprzężeniem prądowym [7]. Poszczególne pętle regulacji połączone są ze sobą i tworzą strukturę kaskadową. Pętla sprzężenia w najniższej warstwie steruje prądem płynącym w uzwojeniach silnika. Regulator prądu jest typu proporcjonalno-całkującego, a wartość prądu ustalana jest zmianami napięcia poprzez regulator PWM. Jako sygnał zwrotny wykorzystywana jest rzeczywista wartość prądu.



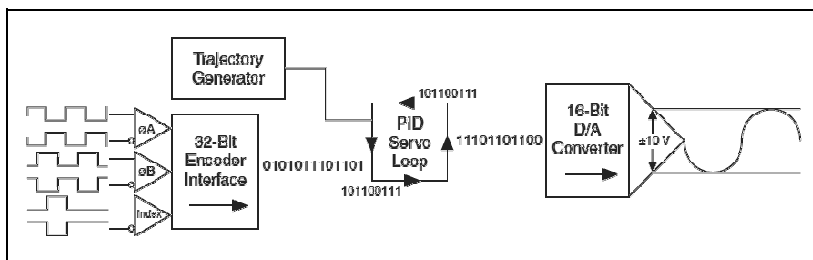
Rys. 3. Wielopoziomowy układ regulacji stosowany w napędzie IndraDrive

Środkowy poziom układu regulacji stanowi pętla sterowania prędkością. Jest to najbardziej złożony element układu sterowania. Ponad 20 parametrów kontroluje prędkość serwosilnika. Pętla sterowania prędkością wykorzystuje mechanizm sprzężenia zwrotnego (*feedback*), sprzężenia do przodu (*feedforward*) oraz regulator typu PI. Ostatnim, najwyższym poziomem jest pętla sterowania pozycją. Jest to regulator typu proporcjonalnego wykorzystujący zarówno mechanizmy *feedback*, jak i *feedforward*. Kaskadowy układ regulacji ze sprzężeniami od położenia i prędkości nazywany jest regulatorem PIV (*Proportional position loop Integral and proportional Velocity loop*). W celu minimalizowania błędu śledzenia trajektorii w układzie z pętlą sprzężenia zwrotnego wykorzystywane jest dodatkowo tzw. sterowanie ze sprzężeniem do przodu (*feedforward*) [7].

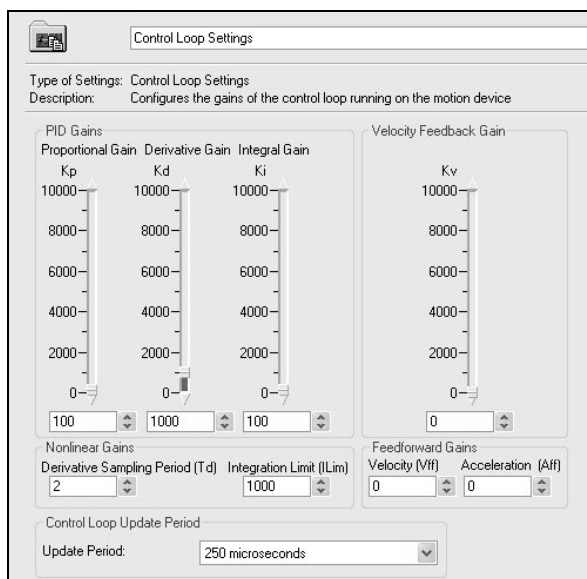
Za pracę regulatora odpowiedzialnych jest blisko 40 parametrów. Wartości parametrów dla wszystkich wewnętrznych funkcji związanych ze sterowaniem są automatycznie ustawiane w momencie podłączenia silników. Ustawienia domyślne są prawidłowe dla większości aplikacji i w większości przypadków nie

wymagają żadnych późniejszych modyfikacji. Jeśli wymagania są bardziej skomplikowane lub specyficzne dla danej aplikacji, można korygować parametry indywidualnie lub skorzystać z funkcji automatycznego strojenia. W procesie optymalizacji pracy napędu pomocna jest również funkcja czterokanałowego oscyloskopu dostępna z poziomu oprogramowania.

Napęd pracujący w trybie prędkościowym korzysta z regulatora bez kontroli położenia – tj. bez pętli o najwyższym poziomie. Sterowanie pozycją odbywa się za pomocą układu nadrzędnego. W manipulatorze karta NI-Motion pełni rolę sterownika nadrzędnego i to ona jest odpowiedzialna za zamknięcie najwyższego poziomu pętli sprzężenia zwrotnego. Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy układów regulacji karty NI-Motion.



Rys. 4. Schemat blokowy układów regulacji karty NI-Motion



Rys. 5. Okno parametryzacji regulatora na karcie NI-Motion, dostępne parametry: wzmocnienia P, I, D, wzmocnienie prędkościowego sprzężenia zwrotnego, wzmocnienia prędkości i przyspieszenia feedforward, czas próbkowania dla modułu różniczkującego oraz limity dla modułu całującego

Karta NI-Motion zawiera regulator PID wykorzystujący mechanizmy feedback oraz feedforward. Rysunek 5 przedstawia okno parametryzacji regulatora na karcie NI-Motion.

4. Dobór nastaw regulatora

Złożoność układów pętli sterujących oraz mnogość dostępnych zmiennych odpowiedzialnych za sterowanie ruchem utrudnia prawidłowe ustawienie parametrów pracy układu napędowego. Zaleca się rozpoczęcie procesu parametryzacji od ustawień standardowych oraz nałożenie ograniczeń na wartości maksymalne prędkości oraz przyspieszeń tak, aby nie było możliwości uszkodzenia układu mechanicznego napędzanego serwowalnikami. Następnie należy stopniowo zmieniać wartości poszczególnych parametrów w celu osiągnięcia optymalnej pracy układu poczynając od pętli o najniższym poziomie (regulacja momentu), przechodząc kolejno do wyższych pętli (regulacja prędkości i położenia). Przed rozpoczęciem strojenia regulatorów należy określić kryteria oceny zachowania serwomechanizmów. W tym celu można przyjąć następujące wskaźniki: dopuszczalny poziom przeregulowania, hałas podczas pracy, stan nieakceptowanych oscylacji, dopuszczalne niedokładności ruchu, czas regulacji itp. W praktyce chcąc uzyskać prawidłową pracę serwonapędu stosuje się dwa podstawowe sposoby doboru nastaw regulatora – iteracyjny, czyli metodą prób i błędów oraz analityczny – wykorzystując np. metodę Zieglera-Nicholsa [6].

Metoda prób i błędów wymaga iteracyjnego powtarzania czynności związanych z zadaniem wymuszenia skokowego i obserwacją odpowiedzi czasowej układu. Na tej podstawie dopasowywane są parametry regulatora tak, aby uzyskać pożądane zachowanie serwomechanizmu [6]. Przed rozpoczęciem strojenia układu regulacji wszystkie nastawy regulatora zeruje się, a potem wykonuje się następujące kroki [8]:

- wyznaczenie odpowiedzi układu regulacji z obiektem dla $K_p = 1$ i określenie, jakie parametry powinny zostać poprawione;
- dodanie wzmocnienia proporcjonalnego w celu poprawienia czasu narastania i zmniejszenia uchybu w stanie ustalonym;
- dodanie akcji różniczkującej w celu zmniejszenia przeregulowania i poprawy czasu regulacji;
- dodanie akcji całkującej w celu wyeliminowania uchybu w stanie ustalonym;
- dostrojenie każdej z nastaw w celu uzyskania pożądanej odpowiedzi całego układu.

Metoda Zieglera-Nicholsa pozwala dobrać nastawy regulatora bez określania własności dynamicznych obiektu regulacji. Przed rozpoczęciem strojenia układu regulacji wszystkie nastawy regulatora zeruje się, potem wykonuje się następujące kroki [6]:

- ustawienie regulatora na działanie proporcjonalne $K_p > 0$;
- dokonanie wymuszenia skokowego;

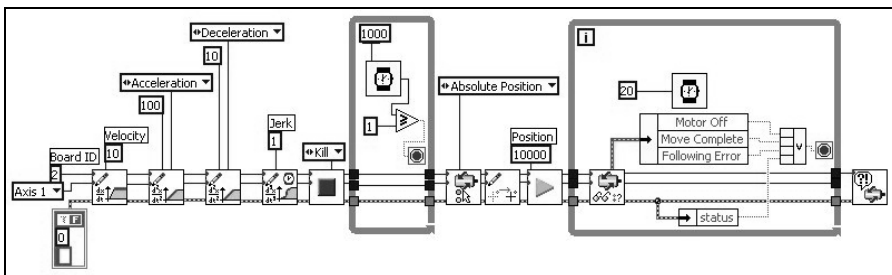
- dodanie wzmocnienia proporcjonalnego aż do powstania drgań niegasnących w układzie regulacji;
- wyznaczenie wartości wzmocnienia krytycznego K_{kr} ;
- wyznaczenie okresu oscylacji drgań niegasnących T_{osc} ;
- dobór optymalnych nastaw regulatora wg kryterium Zieglera-Nicholsa (tab. 1).

Tab. 1. Nastawy parametrów według zasad Zieglera-Nicholsa

Typ regulatora	Optymalne wartości parametrów		
	K_P	T_I	T_D
P	$0,5 \cdot K_{kr}$	–	–
PI	$0,45 \cdot K_{kr}$	$T_{osc}/1,2$	–
PID	$0,6 \cdot K_{kr}$	$T_{osc}/2$	$T_{osc}/8$

5. Oprogramowanie

Jednym z założeń konstrukcyjnych systemu manipulatora była możliwość sterowania układem za pomocą oprogramowania LabView. Przemawiało za tym wiele czynników, m.in. otwartość oprogramowania, czyli możliwość modyfikacji aplikacji użytkowej w dowolnym momencie i łatwego, szybkiego tworzenia nowego oprogramowania oraz możliwość bieżącego śledzenia położenia mikrofonu i synchronizacji pomiarów – konieczne do wykonywania pomiarów „w locie”. Rysunek 6 przedstawia przykład programu do sterowania pojedynczym napędem. W pierwszej kolejności wybierany jest numer karty NI-Motion w systemie oraz oś ruchu. Następnie ustawiane są parametry ruchu: prędkość, przyspieszenie, opóźnienie i poziom szarpnięć. W dalszej kolejności zatrzymywany jest dotychczasowy ruch napędu i wprowadzane opóźnienie potrzebne na zatrzymanie. Kolejne bloki funkcyjne dotyczą ustawienia trybu pozycjonowania (pozycjonowanie absolutne) oraz ustawienia pozycji docelowej. Następnie odbywa się start napędu z zadanymi parametrami i oczekiwanie na zakończenie ruchu. Warunkiem zakończenia pętli oczekiwania jest wyłączenie napędu, osiągnięcie pozycji docelowej lub wystąpienie błędu nadążania.



Rys. 6. Diagram przykładowego programu do sterowania pojedynczym napędem

Podsumowanie

Głównym założeniem przy wyborze systemu sterowania manipulatora była duża elastyczność funkcyjna rozwiązania oraz możliwość łatwego tworzenia i modyfikacji aplikacji użytkowej. Wybór środowiska programowania graficznego LabView oraz systemu sterowania nadrzędnego z zastosowaniem karty NI-Motion umożliwia spełnienie powyższych założeń. LabView wspiera również obsługę szerokiej gamy kart akwizycji danych umożliwiających podłączenie mikrofonów pomiarowych. Zastosowanie jako sterownika nadrzędnego specjalizowanej karty NI-Motion umożliwia uzyskanie niezależnego i równoległego w czasie sterowania napędów. Karta zapewnia bieżące śledzenie położenia mikrofonu i synchronizację pomiarów w „locie” bez zatrzymywania napędów. Zastosowane rozwiązania charakteryzują się dużą uniwersalnością oraz elastycznością. Niestety ze względu na złożoność układów sterujących wymagane jest zapewnienie wysoko wykwalifikowanej obsługi serwisowej.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Batko W., Felis J., Flach A., Giesko T., Kamisiński T., Zbrowski A.: A concept of an actuator for positioning of elements of a measurement system in an anechoic chamber. OSA 2007, LIV Otwarte Seminatum z Akustyki: Rzeszów–Przemyśl, Poland, September 10–14. 2007.
2. Felis J., Zbrowski A., Giesko T., Mężyk J.: Structure Synthesis and Mechanical Parameters Choice for a Manipulating Mechanism for Acoustical Measurements in Anechoic Chamber, Solid State Phenomena Vols. 147–149 (2009) pp 13-18, <http://www.scientific.net/>
3. PN-EN ISO 3745:2007 Akustyka. Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego. Metody dokładne w komorach bezchowych i w komorach bezchowych z odbijającą podłogą
4. Mężyk J., Kamisiński T., Zbrowski A., Flach A.: Hardware Structure of a Control Section of Manipulation Mechanism for Acoustical Measurement in Anechoic Chamber, Solid State Phenomena Vols 147-149 (2009) pp. 7–12, <http://www.scientific.net/>
5. Zbrowski A., Mężyk J., Czajka P.: Modułowy manipulator do pomiarów akustycznych w komorze bezchowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 261, seria Mechanika z. 76, Rzeszów 2009, s. 189–195.

6. Możaryn J.: Sterowanie serwomechanizmami – od układów z otwartą pętlą do PID. Automatyka Podzespoły Aplikacje 3/2007.
7. Możaryn J.: Serwomechanizmy – zaawansowana regulacja prędkości i położenia. Automatyka Podzespoły Aplikacje 6/2007.
8. Tomera M.: Badanie układu sterowania z regulatorem PID. http://www.am.gdynia.pl/~tomera/ts/pid_lab.pdf

Recenzent:
Jan Maciej KOŚCIELNY

The control circuits structure of manipulator system for measurement microphone positioning in anechoic chamber

Key-words

Drive control, manipulator, anechoic chamber, LabView.

Summary

In the article, control circuits are presented for manipulator system for measurement microphone positioning during tests in anechoic chamber. The geometric model of the manipulator and its electric and mechanic parameters are described. Requirements for control section are discussed. The method of combining actuators with superior circuits is presented. The inner structure of complex, multi-stage controllers in stock devices is described. The method of program control for manipulator mechanism is also introduced.