

**Marcin Pawlak, Krzysztof Krawczyk**  
Politechnika Wrocławska, Wrocław

## **STEROWANIE WIELOOSIOWYM NAPIĘDEM POZYCJONUJĄCYM ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO IRB-6**

### **CONTROL OF THE MULTIAXIAL POSITIONING DRIVE SYSTEM IN THE INDUSTRIAL IRB-6 ROBOT**

**Abstract:** This paper describes effect of modernization of an old industrial IRB6-type robot control system. The old original programmer of the robot used analog techniques. It occupied a lot of space and was very energy-consuming. This equipment was completely replaced by the new digital controller, taking advance of the high technology. The new controller utilizes modern DC-DC converter composed of efficient MOSFET-type transistors and consist a fast, versatile AVR-family microprocessor. The renewed robot is controlled with the aid of personal computer with a supervisory software, that allow make a project of motion-sequence of the robot. Detailed hardware and software description in this paper is presented.

#### **1. Wstęp**

W drugiej połowie XX wieku, w powojennej Europie rozpoczął się okres intensywnej odbudowy przemysłu. Zwiększenie wymagań rynku co do ilości i szybkości produkowanych towarów zapoczątkowało rozwój automatyzacji procesów technologicznych. W tym czasie powstało wiele zakładów przemysłowych, w których główny nacisk kierowano na produkcję masową. Efektem tego było powstawanie zautomatyzowanych linii produkcyjnych, w których dotychczasową rolę człowieka przejmowała maszyna. W drugiej połowie lat pięćdziesiątych pojawiły się pierwsze roboty przemysłowe, które wymusiły rozwój nowej dziedziny technicznej zwanej „robotyką”. Dziedzina ta obejmuje wszystko co jest związane z teorią, budową oraz eksploatacją robotów. Głównymi działami dzisiejszej robotyki są:

- kinematyka manipulatorów,
- dynamika manipulatorów,
- planowanie ruchów i optymalizacja trajektorii,
- sterowanie robotów,
- systemy sensoryczne,
- robotyka specjalna (roboty mobilne, podwodne, specjalne),
- eksploatacja robotów,
- elastyczne systemy produkcyjne [1].

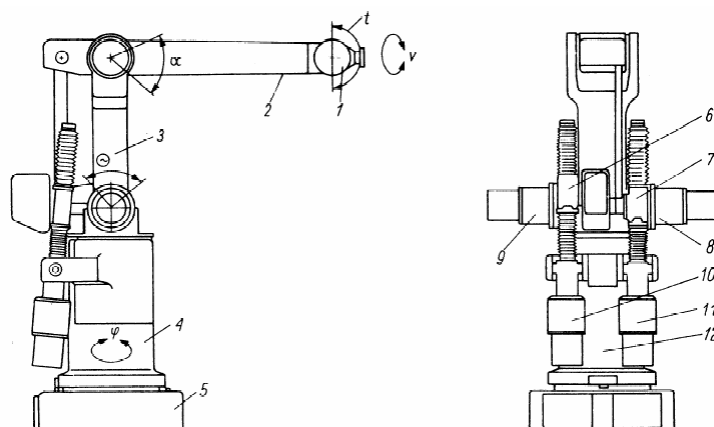
Roboty przemysłowe znajdują głównie zastosowanie przy produkcji wielkoseryjnej, w której skomplikowany cykl technologiczny musi być powtarzany wielokrotnie, z dużą precyzją. Jednym z wymogów nowoczesnych linii produkcyjnych jest możliwość szybkiego „przebrojenia” procesu technologicznego. Najlepszym

przykładem jest przemysł samochodowy, gdzie na jednej taśmie montażowej może być produkowanych kilka różnych modeli aut. Obecnie roboty przemysłowe stosuje się także przy produkcji mało- i średnio-seryjnej, gdzie pracują przy uciążliwych lub niebezpiecznych dla człowieka procesach technologicznych. Główne zastosowanie robotów to: spawanie, szlifowanie, lakierowanie, odlewnictwo, obróbka cieplna, kucie, obróbka plastyczna, cięcie, przenoszenie materiałów, paletyzacja, inspekcje itd. [2].

Kolebką robotów przemysłowych były Stany Zjednoczone, natomiast ich dynamiczny rozwój nastąpił w Japonii, która do dziś wiodzie prym w ich produkcji, będąc światowym potentatem tej branży. Pod względem ilości, na świecie ponad 50% robotów pracuje właśnie w Japonii, na drugim miejscu plasuje się Unia Europejska - około 30%, oraz USA – ok. 10%. Wśród krajów europejskich największa liczba zainstalowanych robotów jest w Niemczech, Włoszech, Francji oraz Wielkiej Brytanii [1].

W Instytucie Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej znajduje się robot przemysłowy IRB-6, który trafił do Laboratorium Napędu Elektrycznego po zakończeniu wieloletniej pracy w jednym z wrocławskich zakładów przemysłowych. Robot ten, posiadający 5 stopni swobody został skonstruowany przez szwedzką firmę ASEA na początku lat 70-tych. Udana konstrukcja manipulatora, szczególnie w zakresie części mechanicznej, wzbudziła uznanie na całym świecie

i sprawiła, że do dnia dzisiejszego roboty te pracują na różnych liniach produkcyjnych wielu zakładów przemysłowych. Jedyną słabą stroną robota był jego oryginalny układ zasilająco-sterujący, wykonany w technice analogowej, z wykorzystaniem tranzystorów bipolarnych. Układ ten był umieszczony w ogromnej, ważącej ponad 300kg szafie i odznaczał się niską sprawnością i stosunkowo dużą awaryjnością. Dlatego też, w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej został zaproponowany temat magisterskiej pracy dyplomowej, której celem była kompleksowa modernizacja układu sterowania robota. Niniejszy referat przedstawia końcowy efekt modernizacji sterownika, która polegała na całkowitym zastąpieniu go nowoczesną konstrukcją, wykorzystującą sterowanie impulsowe oraz technikę mikroprocesorową. Obecnie robot znajduje się na wyposażeniu Laboratorium Automatyki Przemysłowej i znajduje zastosowanie w dydaktyce.



Rys. 1. Budowa części manipulacyjnej robota IRb-6

### 3. Układ sterowania robota

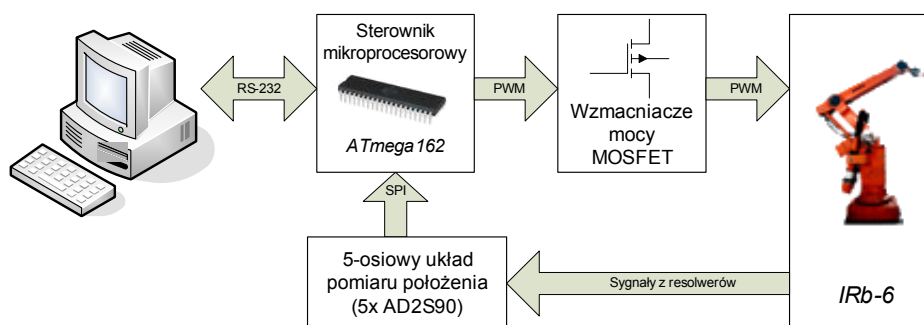
Oryginalny sterownik robota IRb-6 posiadał przestarzałą konstrukcję, która do zasilania i sterowania silników poszczególnych osi robota wykorzystywała technikę analogową. W roli wzmacniaczy mocy pracowały tranzystory bipolarne. Funkcję czujników położenia poszczególnych osi robota pełniły resolwery, które były umieszczone bezpośrednio na wałkach silników napędowych. Oprócz pomiaru położenia, wszystkie silniki robota wyposażone były w analogowe tory pomiaru prędkości obrotowej, której czujnikami były tachoprądnice, zainstalowane bezpośrednio na tarczach silników.

### 2. Budowa robota przemysłowego IRb-6

Robot IRb-6 jest robotem typu kolumnowego, który ze względu na swoją konstrukcję jest zaliczany do grupy robotów z otwartym łańcuchem kinematycznym. Manipulator ten posiada pięć stopni swobody. Na rysunku 1 przedstawiono budowę części manipulacyjnej robota IRb-6. Można na nim wyróżnić następujące podzespoły: 1- przegub, 2- ramię dolne, 3- ramię górne, 4- korpus obrotowy, 5- podstawa, 6- przekładnia śrubowa toczna ruchu ( $\theta$ ), 7- przekładnia śrubowa ruchu ( $\alpha$ ), 8- napęd ruchu ( $v$ ), 9- napęd ruchu ( $t$ ), 10- napęd ruchu ( $\theta$ ), 11- napęd ruchu ( $\alpha$ ), 12- napęd ruchu ( $\varphi$ ). Korpus, ramiona, oraz podstawa robota wykonane są z lekkiego stopu aluminium, co prowadzi do redukcji momentu bezwładności ruchomych części i znacząco poprawia dynamikę ruchów [4].

Do napędu poszczególnych osi robota zastosowano komutatorowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi, odznaczające się bardzo dobrymi właściwościami dynamicznymi.

Ponieważ oryginalny układ sterowania robota wymagał kosztownej naprawy, zdecydowano się na jego gruntowną modernizację, polegającą na całkowitym zastąpieniu go nową konstrukcją. Przy opracowywaniu nowej koncepcji sterownika robota, podstawowym założeniem było wykorzystanie całej, niezmienionej części manipulacyjnej robota, łącznie z silnikami i przetwornikami do pomiaru położenia i prędkości. Nowy sterownik musiał zapewnić możliwość współpracy z komputerem PC, za pomocą którego programowano trajektorie ruchów robota. Schemat ogólny układu sterowania robota IRb-6 przedstawia rysunek 2.



Rys.2. Ogólny schemat układu sterowania robota IRb-6

Nowy układ sterowania manipulatora IRb-6 posiada budowę modułową. Konstrukcję sterownika stanowi solidna metalowa obudowa, przystosowana do montażu na typowym, 19-calowym stojaku laboratoryjnym. W obudowie znajdują się wysuwane kasety, w których umieszczono następujące moduły układu sterowania:

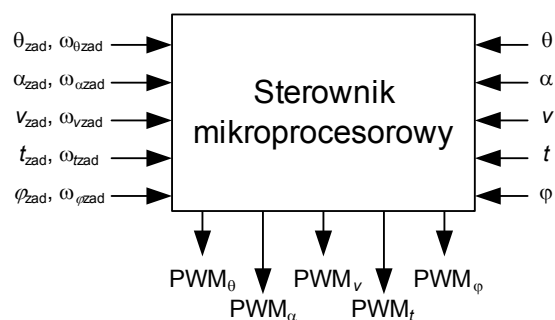
- moduł sterownika mikroprocesorowego (1),
- moduł pomiaru położenia wszystkich osi (2),
- moduły wzmacniaczy mocy (3-7) [3].



Rys.3. Modułowa konstrukcja układu sterowania robota IRb-6

Na rysunku 3 przedstawiono fotografie układu sterowania oraz kaset-modułów po wyjęciu z obudowy. Głównym elementem układu sterowania robota jest sterownik mikroprocesorowy, w którym wykorzystano nowoczesny, szybki 8-bitowy mikrokontroler RISC – Atmega162.

Spośród wielu dostępnych na polskim rynku mikrokontrolerów, wybrano właśnie ten, ze względu na jego dobre parametry, bogate wyposażenie i niską cenę. Układ ten posiada wbudowaną pamięć programu typu flash o pojemności 16kB, jest taktowany sygnałem zegarowym o częstotliwości 16MHz. Ponadto jest wyposażony m.in. w 4 układy czasowo-licznikowe, umożliwiające wygenerowanie 6 sygnałów PWM, 35 programowalnych linii I/O, 512B pamięci EEPROM oraz moduł watchdog. Podstawową funkcją sterownika mikroprocesorowego jest realizacja algorytmu regulacji położenia i prędkości dla pięciu osi napędowych robota. Wartości zadane położenia i prędkości wszystkich osi przesyłane są na bieżąco z komputera PC za pomocą łącza szeregowego RS-232. Jednocześnie sterownik mikroprocesorowy otrzymuje informację z układu pomiaru położenia o aktualnych wartościach położenia poszczególnych osi ( $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $\varphi$ ). Na podstawie porównania wartości zadanych i bieżących sterownik mikroprocesorowy generuje odpowiednie sygnały sterujące (z modulacją PWM), które kierowane są do układu wzmacniaczy mocy. Uproszczony schemat przepływu sygnałów w sterowniku mikroprocesorowym przedstawiono na rysunku 4.

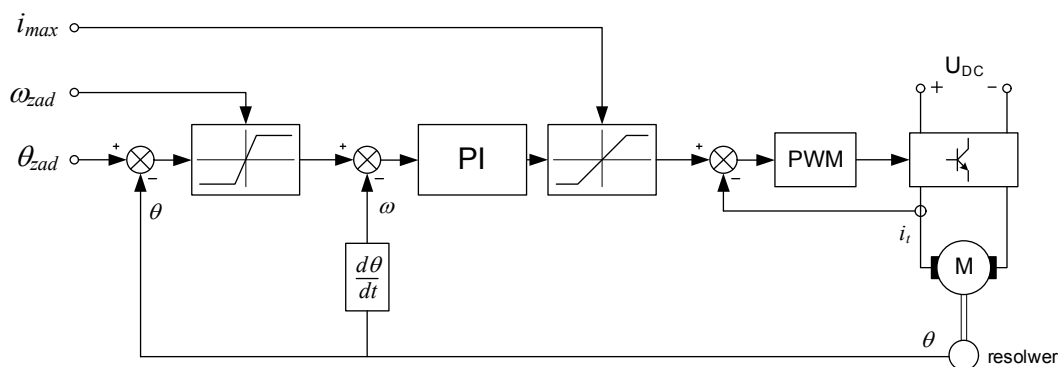


Rys.4. Przepływ sygnałów w sterowniku mikroprocesorowym

Schemat ideowy toru regulacji położenia i prędkości jednej osi robota ( $\theta$ ) przedstawiono na rysunku 5. Jest to struktura kaskadowa, w której regulator położenia jest nadrzędny w stosunku do regulatora prędkości. Regulator położenia jest regulatorem proporcjonalnym z ograniczeniem wartości absolutnej, którego nastawy mogą być ustawiane w szerokim zakresie, dla każdej osi niezależnie. Na wartość ograniczenia sygnału wyjściowego regulatora wpływa wartość prędkości zadanej ( $\omega_{\text{zad}}$ ).

W torze regulacji prędkości zastosowano regulator proporcjonalno-całkujący. Umożliwia on stabilizację prędkości ruchu wszystkich osi robota, niezależnie od obciążenia poszczególnych

silników. Nastawy regulatorów dla każdej osi zostały dobrane eksperymentalnie i zapisane w nieulotnej pamięci EEPROM mikrokontrolera. Na podstawie wartości sygnału z wyjścia regulatora prędkości zostaje wytworzony sygnał sterujący PWM, który zostaje bezpośrednio skierowany do wzmacniacza mocy. Częstotliwość kluczowania sygnału PWM wynosi ok. 22kHz, co stanowi wartość optymalną, przy której sterownik ma najwyższą sprawność, a jednocześnie efekty akustyczne związane z przepływem prądów pulsujących przez uzwojenia silników zanikają [3].



Rys.5. Schemat układu regulacji położenia i prędkości jednej osi robota

Wzmacniacze mocy zbudowane są z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET, połączonych w układzie klasycznego przekształtnika mostkowego DC/DC typu H. Taka konfiguracja umożliwia zasilanie silników wykonawczych poszczególnych osi robota napięciem pulsującym bipolarnym, o średniej wartości zależnej od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego PWM.

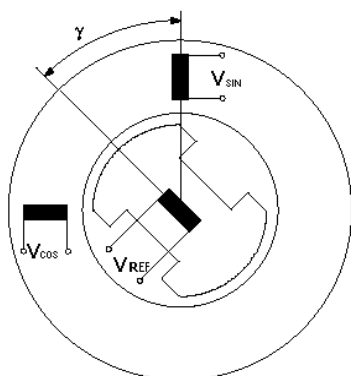
Każdy z zasilanych silników posiada układ ograniczenia maksymalnej wartości prądu twornika, która może być niezależnie ustawiona za pomocą potencjometru. W ten sposób używa się prostą a zarazem skuteczną metodę na ograniczenie momentu obrotowego poszczególnych silników, co bezpośrednio przekłada się na siłę ramienia robota w każdej płaszczyźnie.

Manipulator IRb-6 do pomiaru położenia poszczególnych osi wykorzystuje resolwery, które są zainstalowane bezpośrednio na wałkach wszystkich silników. W nowoczesnych układach napędowych resolwery są używane coraz rzadziej, gdyż w roli przetworników położenia

kątowego na ogół stosuje się cyfrowe enkodery inkrementalne i absolutne. Enkodery cyfrowe zapewniają dużą dokładność pomiaru kąta obrotu oraz posiadają interfejs cyfrowy, co zdecydowanie ułatwia podłączenie ich do mikroprocesorowych układów sterowania. Ponieważ jednym z założeń, którymi kierowano się podczas modernizacji układu sterowania robota było pozostawienie nienaruszonej oryginalnej konstrukcji napędowej i mechanicznej manipulatora, zdecydowano się na wykorzystanie oryginalnych resolwerów w roli przetworników kąta obrotu.

Resolwer z istoty swego działania przypomina transformator obrotowy, który posiada dwa nieruchome uzwojenia oraz jedno uzwojenie ruchome, umieszczone na wirniku. Uzwojenie ruchome jest zasilane najczęściej bezstykowo, na drodze indukcyjnej napięciem sinusoidalnym o częstotliwości od 1-20kHz. Ponieważ uzwojenia nieruchome są przesunięte względem siebie o 90 stopni, napięcia indukujące się w tych uzwojeniach zależą od kąta położenia wirnika i są przesunięte względem siebie w fazie także

o 90 stopni. Dlatego też, sygnały te nazywane są sygnałami pomiarowymi „sinus” i „cosinus”. Budowa resolwera została przedstawiona na rys.6.



Rys.6. Budowa resolwera

Na podstawie zmierzonych wartości napięć indukowanych w uzwojeniach pomiarowych resolwera możliwe jest wyznaczenie kąta położenia wirnika, na podstawie zależności (1):

$$\gamma(t) = \begin{cases} \arctan \frac{V_{\sin}}{V_{\cos}} \end{cases} \quad (1)$$

Aby wyznaczyć kąt położenia wirnika dla wszystkich osi robota, mikroprocesor sterownika robota musiałby wykonywać złożone operacje matematyczne kilka tysięcy razy w ciągu sekundy. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie specjalizowanych układów scalonych, które wykonają te obliczenia, odciążając główny procesor sterownika. Jednym z takich układów jest układ AD2S90 produkowany przez firmę Analog Devices, który na podstawie sygnałów analogowych odbieranych z uzwojeń resolwera, wyznacza względne położenie katowe i przedstawia je w postaci cyfrowej. Przetwornik ten posiada 12-bitową rozdzielczość, co zapewnia dokładność pomiaru położenia katowego na poziomie 10 minut katowych. Ponadto pozwala na bezpośredni pomiar prędkości obrotowej, umożliwia emulację enkodera inkrementalnego oraz posiada wyjście analogowe emulujące prądnicę tachometryczną. W układzie sterowania manipulatora IRb-6 zastosowano 5 takich przetworników, po jednym dla każdej osi robota, które komunikują się ze

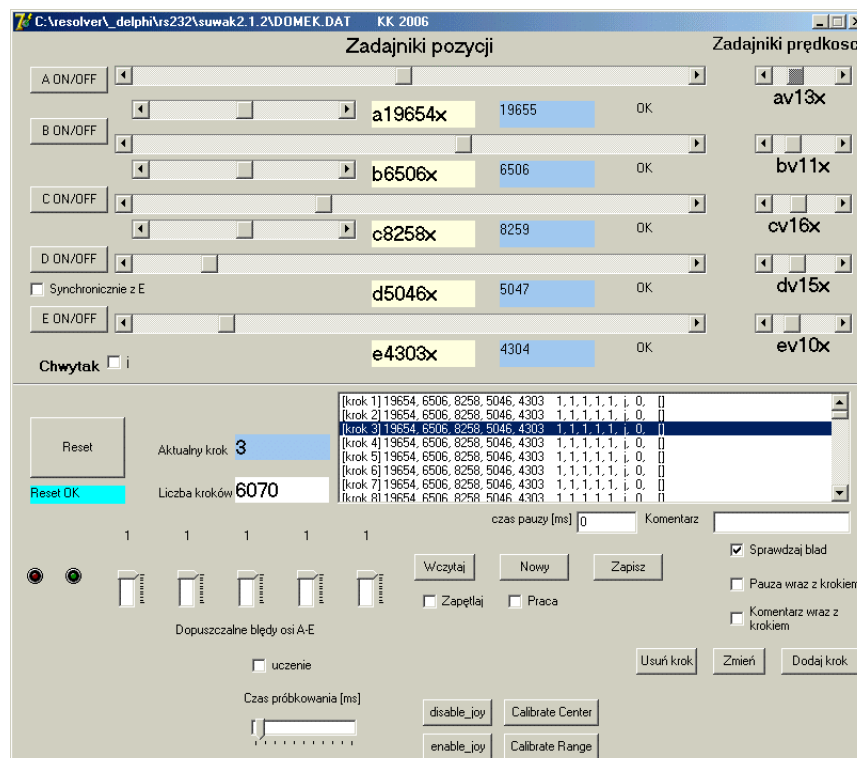
sterownikiem mikroprocesorowym za pomocą cyfrowego interfejsu szeregowego SPI. Mikroprocesor przelicza odczytane wartości względnego położenia katowego silników na położenie bezwzględne poszczególnych osi robota [3].

#### 4. Oprogramowanie sterujące

Programowanie sekwencji ruchów robota przemysłowego IRb-6 odbywa się za pomocą komputera PC, z zainstalowanym oprogramowaniem sterującym. Program sterujący został napisany w języku Object Pascal, w środowisku Borland Delphi 7.0. Głównym zadaniem aplikacji sterującej jest komunikacja i wymiana danych ze sterownikiem robota w czasie rzeczywistym, przy wykorzystaniu portu szeregowego RS-232 o prędkości transmisji 115,2kb/s.

Główne okno programu sterującego przedstawiono na rysunku 7. Oprogramowanie umożliwia ustawienie położenia poszczególnych osi robota za pomocą suwaków zgrubnych i dokładnych. Każdy punkt przestrzeni roboczej manipulatora może zostać zapamiętany, tak aby utworzyć program sekwencji ruchów robota. Prędkość przejazdu pomiędzy dwoma dowolnymi punktami może być dowolnie ustawiona, niezależnie dla każdej osi. Istnieje możliwość zadawania przerw o dowolnym czasie trwania oraz zastosowanie instrukcji warunkowych i zapętleń. Zaprogramowana sekwencja może być w każdej chwili edytowana, zaś efekt końcowy pracy można utrwalić w postaci programu przejazdu zapisanego w pliku na dysku komputera. Projektowanie trajektorii ruchu ramienia robota znacznie ułatwia opcja współpracy z joystickiem. W tym trybie pracy, ruch ramienia robota jest sterowany on-line za pomocą dołączonego do komputera standardowego joysticka analogowego, wykorzystywanego głównie do gier komputerowych. Wybrane punkty położenia ramienia robota mogą być w każdej chwili dodane do programu.

Oprócz podstawowych funkcji sterujących, oprogramowanie umożliwia weryfikację wprowadzonych nastaw regulatorów i wartości granicznych w torze regulacji, co umożliwia kształtowanie charakterystyk dynamicznych poszczególnych osi manipulatora.



Rys.7. Główne okno programu sterującego robota IRb-6

## 5. Podsumowanie

Przedstawiony w referacie zmodernizowany układ sterowania robota przemysłowego IRb-6 charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami technicznymi. W konstrukcji sterownika zastosowano współczesną technikę sterowania impulsowego silników, co w połączeniu z zastosowaniem nowoczesnych podzespołów energoelektronicznych i techniki mikroprocesorowej doprowadziło do wyraźnej poprawy parametrów eksploatacyjnych robota oraz pozwoliło w istotnym stopniu zredukować wymiary obudowy sterownika. Przyjęty sposób sterowania manipulatora za pomocą komputera PC znacząco rozszerza jego możliwości funkcjonalne, ułatwia programowanie oraz poprawia wygląd interfejsu użytkownika. Ponadto, z poziomu komputera możliwy jest optymalny dobór właściwości dynamicznych poszczególnych torów regulacji poprzez dostosowanie ich nastaw do charakteru pracy robota.

## 6. Literatura

- [1]. Jezierski E., *Dynamika robotów*, WNT 2006
- [2]. Morecki A., Knapczyk J., *Podstawy robotyki* - praca zbiorowa, WNT 1999
- [3]. Krawczyk K., *Sterowanie wieloosiowym napędem pozycjonującym z silnikami prądu stałego*,

praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Wrocław 2006

- [4]. *Roboty przemysłowe typu IRb i IRp*, Robotyka nr 4, WNT 1990

## Autorzy

Dr inż. Marcin Pawlak

E-mail: marcin.pawlak@pwr.wroc.pl

Politechnika Wrocławska

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

Mgr inż. Krzysztof Krawczyk

absolwent PWR, 2006r.