

Rok akademicki 2009/2010

POLITECHNIKA WARSZAWSKA  
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH  
INSTYTUT MIKROELEKTRONIKI I OPTOELEKTRONIKI



**PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA**

Michał Wałęcki

**Sprzętowy sterownik manipulatora IRp6**

Opiekun pracy:  
dr inż. Tomasz Winiarski

Ocena pracy: .....

.....

Data i podpis Przewodniczącego

Komisji Egzaminu Dyplomowego

## **„Sprzętowy sterownik manipulatora IRp6”**

W ramach pracy magisterskiej zrealizowano system sterowania manipulatorem przemysłowym IRp6 wykorzystywanym w pracowni robotyki Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej. Miało to na celu wyeliminowanie problemów występujących przy eksploatacji dotychczas wykorzystywanego systemu oraz implementację mechanizmów, których realizacja nie była dotąd możliwa.

W ramach pracy zaprojektowano, wykonano i uruchomiono zestaw modułów elektronicznych sterowników osi manipulatora, a także instalację elektryczną szafy sterowniczej zapewniającą zasilanie dla sterowników oraz realizującą procedury bezpiecznego załączania i wyłączenia sekcji zasilania.

Opracowane rozwiązanie spełnia postawione wymagania.

## **„Hardware driver for IRp6 manipulator”**

Within the confines of the thesis a control system was built for IRp6 industrial manipulator used in robotics laboratory of Institute of Control and Computation Engineering. The purpose was to eliminate problems occurring while using previous system and to implement functions that were not available so far.

A set of electronic servo controllers and electrical installation were designed and developed as components of control and power system of the robot.

The developed units fulfill the assumptions.

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>3</b>
1.1	Geneza pracy . . . . .	3
1.2	Cel pracy . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Przegląd dostępnych technologii</b>	<b>4</b>
2.1	Sterowanie silnikiem prądu stałego . . . . .	4
2.2	Pomiar prądu silnika . . . . .	6
2.3	Komunikacja z komputerem . . . . .	7
2.4	Regulacja pozycji i prądu silnika . . . . .	9
2.5	Zagadnienia bezpieczeństwa . . . . .	9
2.6	Rozwiązania komercyjne . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Założenia i wymagania</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Realizacja</b>	<b>18</b>
4.1	Zintegrowany sterownik osi . . . . .	18
4.2	Instalacja szafy sterowniczej . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Wdrożenie systemu</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>37</b>

# 1 Wstęp

## 1.1 Geneza pracy

MRROC++ [1, 2] to programowa struktura ramowa stworzona w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej, której głównym zastosowaniem jest wspomaganie tworzenia sterowników dla systemów wielorobotowych. Oprogramowanie MRROC++ jest użyte w Laboratorium Robotyki Instytutu do sterowania manipulatorami IRp6. Mimo że komputerowe algorytmy sterowania są stale dopracowywane i rozwijane, sprzętowa część systemu - elektroniczne sterowniki osi wraz z końcówkami mocy do silników, projektowane na początku lat 90-tych [3], sprawiają szereg problemów wynikających z przestarzałej technologii i charakteru eksploatacji. Należą do nich:

- komunikacja oparta o kartę rozszerzeń ISA, która obecnie nie jest wspierana.
- brak możliwości budowy szybkich zintegrowanych kaskadowych regulatorów pozycyjno-prądowych.
- mało dokładny pomiar prądu silników związany z rozdzielaniem sterownika osi na część logiczną i końcówkę mocy umieszczone w różnych miejscach szafy sterowniczej. Analogowe niskonapięciowe sygnały są prowadzone długimi przewodami w silnie zakłócanym środowisku.
- drażniący dźwięk będący skutkiem generacji do sterowania silnikami sygnału PWM o słyszalnej częstotliwości rzędu kilkunastu kHz.
- przestarzała technologia. Modernizacja sprzętu byłaby kłopotliwa ze względu na już dokonane w nim przeróbki, a naprawy w przypadku awarii są utrudnione ze względu na słabą dostępność komponentów z lat 90.

- stopień komplikacji połączeń wewnątrz szaf sterowniczych manipulatorów, wewnątrz których również widać ślady modyfikacji - przecięte przewody, ręcznie wykonane płytki, złącza i przejściówki. W takich warunkach w przypadku jakiegokolwiek awarii lub choćby wypięcia się przewodu z kostki przyłączeniowej, lokalizacja usterki może okazać się niewykonalna.

## 1.2 Cel pracy

Celem pracy magisterskiej było stworzenie nowoczesnego, niezawodnego, łatwego w obsłudze i serwisowaniu oraz dobrze udokumentowanego systemu sterowania osiami manipulatorów IRp-6, będących na wyposażeniu Laboratorium Robotyki Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Konstrukcja systemu miała być oparta o współcześnie stosowane technologie i umożliwiać przeniesienie części lub całości zadań regulacji z systemu komputerowego na sterowniki osi.

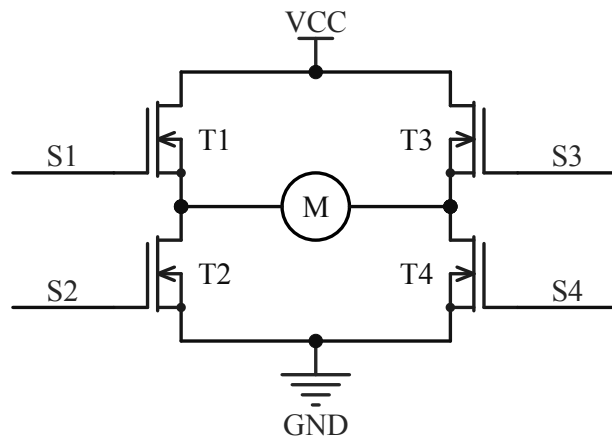
Niniejsze opracowanie obejmuje przegląd technologii stosowanych w sterowaniu napędami elektrycznymi, wytyczenie założeń projektu oraz sprawozdanie z ich realizacji. Na koniec przedstawione zostało porównanie opracowanego systemu z rozwiązaniami komercyjnymi.

## 2 Przegląd dostępnych technologii

### 2.1 Sterowanie silnikiem prądu stałego

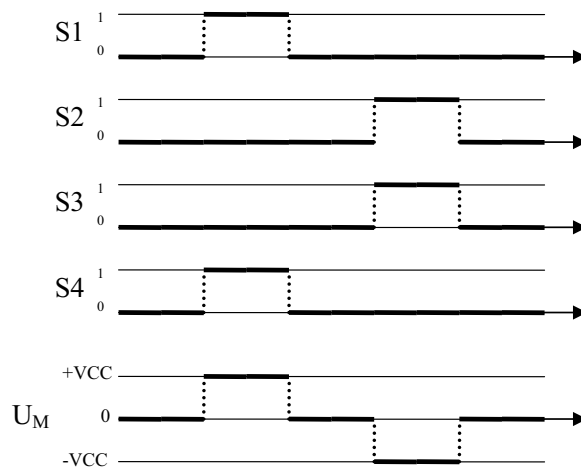
W manipulatorach IRp6 zastosowano silniki szczotkowe prądu stałego obcowzbudne - z magnesem trwałym. Jest to typ najprostszy w sterowaniu spośród silników elektrycznych. Moment siły silnika jest wprost proporcjonalny do prądu jego twornika. Co za tym idzie, aby sterować kierunkiem obrotu silnika, należy wywołać przepływ prądu przez jego cewkę w odpowiednim

kierunku. Klasycznym rozwiązaniem sterowania silnikiem prądu stałego do pracy dwukierunkowej jest H-mostek. Jego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 1. Jest to układ elektroniczny, który może zasilać silnik M napięciem



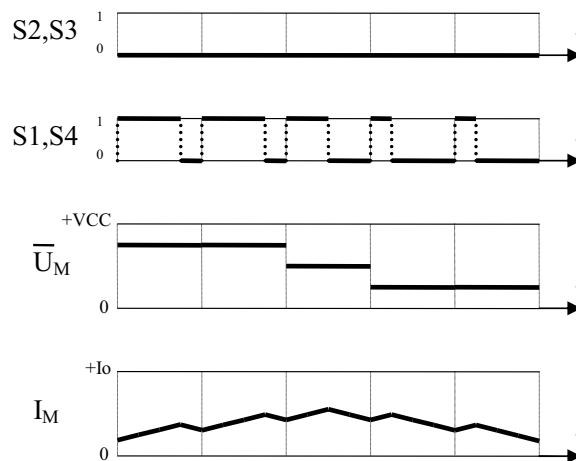
Rysunek 1: Schemat ideowy H-mostka

o polaryzacji ujemnej lub dodatniej. Kluczem do wyboru kierunku ruchu silnika jest odpowiednie sterowanie tranzystorami: T1, T2, T3, T4, tak, aby otwierać pary: T1 i T4 lub T2 i T3. Przedstawiono to na rysunku 2.



Rysunek 2: Sterownie polaryzacją napięcia na wyprowadzeniach silnika

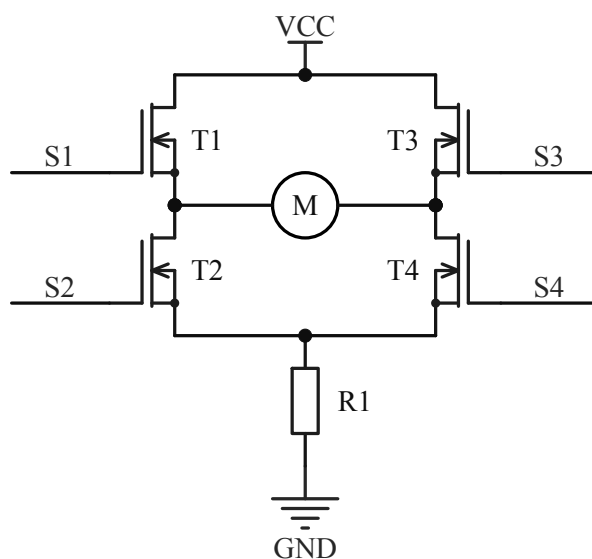
W silnikach prądu stałego najbardziej wydajnym i najpowszechniej stosowanym sposobem regulacji prędkości obrotowej jest kluczkowanie napięcia zasilającego sygnałem złożonym z impulsów o zmiennej szerokości (PWM – pulse width modulation). Tranzystory przełączane są między dwoma stanami - zatkania i nasycenia. Jak pokazuje rysunek 3, w ten sposób uzyskuje się zależną od szerokości impulsu średnią wartość napięcia zasilającego na okres sygnału PWM. Rysunek przedstawia również przykładowy przebieg wartości prądu płynącego przez silnik. Prąd twornika narasta, gdy tranzystory po przekątnej H-mostka są w nasyceniu, a maleje, gdy wszystkie tranzystory są zatkane.



Rysunek 3: Sterownie średnią wartością napięcia zasilania silnika

## 2.2 Pomiar prądu silnika

Do pomiaru prądu silnika DC stosuje się najczęściej jedno z dwóch rozwiązań. Pierwszym z nich jest umieszczenie rezystora między źródłami dolnych tranzystorów H-mostka a masą, jak pokazano na rysunku 4 i obserwacja napięcia odłożonego na rezystorze. Metoda ta jest powszechna ze względu na prostotę



Rysunek 4: Schemat ideowy H-mostka z rezystorem do pomiaru prądu

i niski koszt. Jej główną wadą są straty mocy wydzielanej na rezystorze w postaci ciepła. Drugą metodą to użycie gotowego przetwornika prąd-napięcie, który do działania wykorzystuje efekt Halla. Jego podstawową zaletą jest izolacja galwaniczna między obwodem, którego prąd jest mierzony, a układem pomiarowym i sygnałem wyjściowym.

### 2.3 Komunikacja z komputerem

W przemyśle stosowanych jest wiele standardów komunikacyjnych, zapewniających zarówno wysoką szybkość transmisji, jak i odporność na zakłócenia. Jednak w przypadku komunikacji z komputerem klasy PC wybór warstwy sprzętowej komunikacji znacznie się zawęża. Wśród interfejsów dostępnych dla PC najpowszechniej stosowane to:

- RS-232 - interfejs szeregowy przeznaczony do szeregowej transmisji danych w trybie full duplex z prędkościami typowo do 100kbps, w topologii point-to-point (urządzenie-urządzenie).

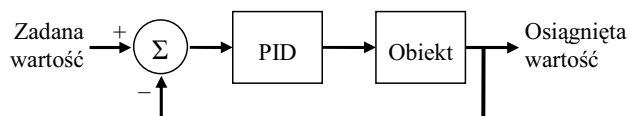


- RS-422 - interfejs szeregowy o dwóch liniach różnicowych między nadajnikiem a odbiornikami, które zapewniają dużą odporność na zakłócenia. Możliwe topologie to full duplex point-to-point oraz multi-drop (urządzenie nadrzędne komunikuje się z wieloma podrzędnymi, które jednak nie mogą przesyłać danych między sobą). Osiągane są szybkości transmisji do 10Mbps.
- RS-485 - rozszerzenie standardu RS-422 o tryb half duplex multi-point (dzięki zastosowaniu jednej dwuprzewodowej linii różnicowej oraz nadajników linii, które mają możliwość ustawienia wyjść w stan wysokiej impedancji). Szybkość transmisji do 10Mbps.
- USB2.0 - szybkość 1.5, 12 lub 480 Mbit/s. Rzadko stosowany w warunkach przemysłowych ze względu na stosunkowo dużą podatność na zakłócenia oraz długość przewodów ograniczoną do 5m. Są również duże opóźnienia w transmisji.
- CAN - interfejs zdobywający coraz większą popularność wśród sterowników przemysłowych. Podobnie jak RS-485, jest odporny na zakłócenia dzięki transmisji różnicowej pojedynczą skrętką. Maksymalna szybkość transmisji to 1Mbps. Problemem w stosowaniu magistrali CAN jest mała wydajność w przypadku przesyłania ilości danych większych niż kilka bajtów oraz drogie i trudno dostępne karty rozszerzeń dla komputerów PC.
- Ethernet - interfejs, w który standardowo wyposażane są współczesne komputery. Jego przepustowość sięga 1Gbps i świetnie nadaje się do przesyłu dużych ilości danych. Jego problemem jest obsługa aplikacji czasu rzeczywistego, w których krytycznym czynnikiem jest przesyłanie danych w precyzyjnie określonym czasie. Rozwijane są odmiany

Ethernetu przemysłowego, które coraz skuteczniej radzą sobie z tym problemem, jednak urządzenia do ich obsługi są drogie i trudno osiągalne.

## 2.4 Regulacja pozycji i prądu silnika

Obecnie przytłaczająca większość regulatorów stosowanych w automatyce to regulatory typu PID - proporcjonalno-całkująco-różniczkujące. Są to dobrze opanowane mechanizmy, które pozwalają dość dokładnie dopasować sterowanie do charakterystyki sterowanego obiektu przy użyciu niewielkiej liczby parametrów. Schemat blokowy regulatora PID przedstawiono na rysunek 5.

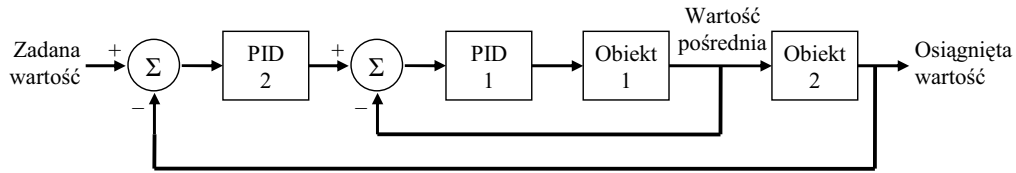


Rysunek 5: Regulator PID

Często korzystnym jest użycie struktury kaskadowej regulatora (rysunek 6). Jest to możliwe, gdy obiekt da się podzielić na części, między którymi przekazywana jest mierzalna wielkość. Pętla 1 regulatora, wewnętrzna, z reguły pracuje dużo szybciej od wiodącej zewnętrznej pętli 2. Taki układ pozwala kompensować niedoskonałości i nieliniowości obiektu oraz wydzielić podrzędną część obiektu, której oddzielna regulacja może być korzystna z punktu widzenia całego procesu sterowania.

## 2.5 Zagadnienia bezpieczeństwa

Podczas pracy systemu robotycznego mogą zdarzyć się sytuacje, gdy zagrożone jest zdrowie ludzkie lub istnieje ryzyko uszkodzenia sprzętu. Dzieje się



Rysunek 6: Regulator kaskadowy PID

tak, gdy z powodu wadliwego działania urządzeń lub błędu operatora efektor zaczyna poruszać się poza zakresem normalnej pracy. W przemyśle do ochrony przed wtargnięciem w pole działania maszyn stosuje się wiele nowoczesnych urządzeń. Coraz większą popularnością cieszą się np. skanery laserowe, które można uczyć, które z obserwowanych stref powinny być wyłączone z dostępu z zewnątrz. W przypadku pojawienia się obiektów w zakazanych strefach, skaner przystępuje do wykonania zaprogramowanej reakcji.

Praca efektorów w dopuszczalnym zakresie ruchu jest natomiast kontrolowana przez przełączniki krańcowe. Przełączniki są realizowane w sposób czysto mechaniczny, przez parę styków zwierających lub rozwierających przełączanych przez krzywkę w przypadku zbliżenia efektora do krańca zakresu normalnej pracy lub w sposób elektroniczny - przy pomocy optycznych czujników szczelinowych lub odbiciowych, czy indukcyjnych.

Mechanizmy bezpieczeństwa ze względu na sposób realizacji można podzielić na dwie podstawowe kategorie. Są to:

- mechanizmy programowe, w których oprogramowanie wykonuje reakcję na wykryte niebezpieczeństwo. Może to być zatrzymanie urządzenia, ruch w przeciwnym kierunku, ograniczenie siły efektora do ustalonego poziomu itp.
- mechanizmy sprzętowe, gdzie niebezpieczna sytuacja może być wykry-

wana przez oprogramowanie, ale reakcja na nią wykonywana jest na najniższym poziomie sprzętowym. Do tej kategorii należy np. odłączanie zasilania efektorów po wykryciu ich położenia poza dozwolonym obszarem.

W przypadku nowo budowanego systemu, który może nie być jeszcze do końca dopracowany, właściwsze wydaje się stosowanie jako głównych mechanizmów bezpieczeństwa prostszych koncepcyjnie zabezpieczeń, działających na poziomie sprzętowym.

## 2.6 Rozwiązania komercyjne

Silniki szczotkowe prądu stałego stosuje się w nowych konstrukcjach coraz rzadziej. Jest to spowodowane kilkoma czynnikami. Ważniejsze z nich to:

- zużywające się szczotki,
- wytwarzanie silnych zakłóceń elektromagnetycznych spowodowane iskrzeniem na styku szczotek z komutatorem,
- iskrzenie szczotek eliminuje takie silniki z zastosowań w obiektach o zwiększonym ryzyku wybuchu lub pożaru.

Z tego względu coraz trudniej osiągalne na rynku są dedykowane sterowniki silników DC. Rozszerza się za to oferta wielofunkcyjnych sterowników silników bezszczotkowych, które jednak są droższe ze względu na bardziej złożoną budowę.

Popularnymi przykładami sterowników silników BLDC z funkcją obsługi silnika DC są urządzenia z serii SimplIQ Harmonica firmy Elmo oraz Epos firmy Maxon Motor. Zestawienie ich parametrów w kontekście wymagań systemu robotycznego Laboratorium Robotyki przedstawiono w tabelicy 1.

	Elmo SimplIQ Harm. 12/60	Maxon Epos2 70/10	Stary sterownik osi
Napięcie zasilania	10..59V DC	10..75V DC	35..50V DC
Max. ciągły prąd silnika	13,3A	10A	30A
Regulator pozycji	tak, max. 80Hz	b.d., próbkowanie 1kHz	z pętlą zamkniętą przez system MRROC++, 500Hz
Regulator prądu	tak, max. 2,5kHz	b.d., próbkowanie 10kHz	nie
Częst. przełączania	22kHz	50kHz	ok. 10kHz
Interfejs	RS-232, CANopen	RS-232, CANopen, USB2.0	ISA
Cykl komunikacji	b.d.	b.d.	2ms

Tablica 1: Porównanie wybranych parametrów sterowników z funkcją obsługi silników DC

Wynika z niej, że mimo upływu czasu, stare sterowniki osi manipulatorów działające pod kontrolą systemu MRROC++ nadal dorównują, jeśli nie przewyższają rozwiązania komercyjne pod względem okresu regulacji. Oferują możliwość stworzenia szybkiego regulatora z pętlą sprzężenia zamkniętą w komputerze PC. W każdym cyklu 2ms system komputerowy otrzymuje wyniki pomiaru pozycji i odczyty z czujników oraz na ich podstawie ustawia nowe wypełnienie sygnału PWM do sterowania stopniem mocy. Produktowi firmy Elmo wykonanie jednego cyklu regulatora położenia, tylko na podstawie uchybu zadanego położenia zajmuje przynajmniej 12,5ms. Firma Maxon nie udostępnia dokładnych danych na temat szybkości działania regulatorów w sterowniku Epos2, wiadomo tylko, że odczyt pozycji może być aktualizowany co 1ms (dla porównania - w Elmo SimplIQ Harmonica okres ten wynosi 250us). Widać też, że w porównaniu do parametrów znamionowych silników

manipulatora IRp6 najmocniejszy sterownik z serii - Epos2 70/10 ma zbyt niską wartość maksymalnego ciągłego prądu silnika.

### 3 Założenia i wymagania

Pierwotnie przed autorem pracy zostało postawione zadanie modernizacji układów sterowania manipulatorami IRp6. Zamierzano umieścić w szafie sterowniczej komputer PC wyposażony w komercyjne sterowniki osi oraz wykorzystać istniejące końcówki mocy do przyłączenia silników. Po przejrzaniu oferty dostępnych na rynku sterowników osi i analizie zamontowanych w szafach końcówek mocy okazało się jednak, że wykorzystywane dotychczas końcówki mocy wymagałyby przeróbek ze względu na sposób ich sterowania. Poza tym dokonane wcześniej modyfikacje spowodowały, że układy końcówek mocy nie były zgodne z zasadami projektowania obwodów drukowanych. Do najbardziej znamienitych przykładów należała zmiana punktu pomiaru prądu silnika w końcówce mocy, która została uzyskana m.in. przez przecięcie płaszczyzny masy i poprowadzenie równoległe do płytki kilku przewodów wysokoprądowych. To spowodowało powstanie pętli prądowej, która znacznie zwiększała emisję zakłóceń.

W wyniku tego zrewidowano założenia i zaproponowano inne rozwiązanie. Każda oś manipulatora miała otrzymać nowy niezależny sterownik złożony ze sterownika osi zintegrowanego z końcówką mocy. Wszystkie zintegrowane sterowniki miały być połączone z komputerem PC za pośrednictwem interfejsu RS-422. Takie rozwiązanie miało pozwolić uniknąć błędów popełnionych przy projekcie starych końcówek mocy, zlikwidować potrzebę prowadzenia w szafie sterowniczej dziesiątek przewodów między sterownikami i końcówkami mocy oraz zapewnić niezawodność systemu - awaria jednego ze sterowników nie powinna wpływać na pracę innych. W takim wypadku wadliwy sterownik można natychmiast wymienić, dysponując zapasowym.

Poza stworzeniem zintegrowanych sterowników osi zdecydowano wymienić instalację szaf sterowniczych. Usunięcie dziesiątek niepotrzebnych prze-

wodów i płyt, pozostałych po poprzednich modyfikacjach systemu oraz zastosowanie nowoczesnych zasilaczy impulsowych i styczników o niewielkich gabarytach pozwoliłoby zmieścić system sterowania obydwu manipulatorów IRp6 w jednej szafie sterowniczej zamiast w dwóch, jak do tej pory.

Ze względów ekonomicznych wymianie nie podlegały:

- Silniki. W napędach manipulatorów IRp6 zamontowane są silniki szczotkowe prądu stałego o parametrach znamionowych 28A 35V.
- Enkodery. Manipulator IRp6 był fabrycznie wyposażony w rezolwery do odczytu pozycji wału każdego silnika oraz prądnice tachometryczne do pomiaru jego prędkości obrotowej. Ze względu na małą precyzję oraz skomplikowane układy potrzebne do odczytu sygnału z tych urządzeń, w jednym z manipulatorów zostały one już wcześniej wymienione na prostsze w obsłudze oraz bardziej niezawodne enkodery inkrementalne typu MOK40.
- Prostownik. Szafa sterownicza była wyposażona w zespół trzech transformatorów oraz mostek prostowniczy do zasilania silników manipulatora. Było to sprawdzone i skuteczne rozwiązanie i nie wymagało modyfikacji.
- Okablowanie. Wymiana wszystkich przewodów wiązałaby się z pracochłonną rozbiórką manipulatorów. Z tego względu postanowiono zachować wszystkie przewody wychodzące z szafy sterowniczej - zarówno zasilające silniki, jak i przewody sygnałowe i zasilające enkodery oraz przełączników.

## **Założenia projektu**

Przed zintegrowanym sterownikiem osi postawiono następujące wymagania:



- Dostarczenie mocy do silnika szczotkowego prądu stałego o wartościach znamionowych prądu i napięcia 28A 35V. Średnia wartość napięcia na silniku powinna być dozowana przez otwieranie stopnia zasilającego silnik w impulsach o zmiennym czasie trwania (PWM), powtarzanych z częstotliwością powyżej wartości słyszalnych dla człowieka.
- Odczyt stanu przełączników krańcowych wykrywających obrót danej osi manipulatora poza dopuszczalny zakres.
- Odczyt stanu przełącznika pola synchronizacji, używanego podczas procedury bazowania (ustawienia manipulatora w położeniu zerowym, będącym odniesieniem dla innych pozycji).
- Odczyt sygnału z enkodera inkrementalnego dla obliczenia prędkości i położenia wału silnika.
- Komunikacja z komputerem PC o szybkości umożliwiającej 1ms cykle komunikacji. Cykl komunikacji miałby składać się z przesłania polecenia do sterownika, przetworzenia polecenia, odesłania odpowiedzi do komputera i gotowości na następne polecenie. Rozmiary komunikatów wymienianych między sterownikiem a komputerem nie powinny przekroczyć 16B każdy.
- Możliwość włączenia stopu awaryjnego w szafie sterowniczej w przypadku wykrycia niebezpiecznej sytuacji.
- Możliwość pracy w trybach:
  - PWM – ustawiania zadanego z komputera wypełnienia sygnału dla stopnia mocy. Tryb ten ma zapewnić kompatybilność z dotychczasowym sposobem sterowania manipulatorami przez środo-

wisko MRROC++, w celu bezproblemowego wdrożenia nowego systemu,

- ręczne sterowanie ruchem silnika przy pomocy przycisków znajdujących się na panelu sterownika,
- regulator położenia – ustawianie osi manipulatora w pozycji zadanej przez komputer,
- regulator prądu – wywołanie przepływu przez uzwojenie silnika prądu o wartości zadanej przez komputer,
- kaskadowy regulator pozycyjno-prądowy.

Szafa sterownicza miała zostać wyposażona w zestaw zasilaczy i styczników, spełniających następujące funkcje:

- Dostarczenie zasilania do 2 zestawów po 8 zintegrowanych sterowników osi - każdy zestaw do obsługi jednego manipulatora.
- Podział obwodów zasilania na sekcje z możliwością ręcznego załączania oraz wyłączenia zasilania w wybranych sekcjach.
- Doprowadzenie do sterowników linii obwodu stopu awaryjnego, którego przecięcie powoduje odłączenie sekcji zasilania silników.
- Kontrola przez ręczne panele sterownicze - jeden na obudowie szafy oraz jeden łatwiej dostępny, znajdujący się na środku laboratorium, połączony z szafą przewodem. Panele miały służyć do załączania sekcji zasilania po włączeniu zasilania szafy oraz do ponownego załączenia zasilania stopni mocy po włączeniu stopu awaryjnego.
- Umożliwienie przyłączenia większej ilości przycisków stopu awaryjnego.

## 4 Realizacja

### 4.1 Zintegrowany sterownik osi

Do projektu schematu elektrycznego oraz obwodu drukowanego zintegrowanego sterownika osi wykorzystano środowisko Altium Designer. Ze względu na brak wielu elementów w oryginalnych bibliotekach oraz dla ujednoczenia stylu symboli elektrycznych i pól montażowych na płytkach drukowanych stworzono nową bibliotekę elementów, zawierającą wszystkie zastosowane układy. W załączniku 1 umieszczono schemat elektryczny sterownika.

#### Jednostka centralna

Zintegrowany sterownik osi został zrealizowany w oparciu o mikrokontroler sygnałowy dsPIC33FJ64MC204 firmy Microchip. Wybór tego układu został podyktowany następującymi względami:

- „sygnałowa” architektura ułatwia implementację oraz usprawnia pracę regulatorów pozycyjno-prądowych,
- układ posiada dedykowane wejście dla sygnału kwadraturowego z enkodera,
- wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy umożliwia pomiar prądu silnika,
- sygnał PWM dla wysterowania silnika może być generowany sprzętowo i zsynchronizowany z wyzwoleniem pomiaru przetwornika analogowo-cyfrowego. Umożliwia to pomiar prądu silnika w wybranym momencie cyklu,
- mechanizm bezpośredniego dostępu do pamięci (DMA) umożliwia szybką komunikację z komputerem realizowaną w dużej mierze sprzętowo.

## Stopień mocy

Stopień mocy sterownika zbudowano w postaci H-mostka złożonego z czterech N-kanalowych tranzystorów MOS. Jest to klasyczne rozwiązanie zasilania silnika prądu stałego. Do sterowania tranzystorów wybrano układ IR2127S. Jest to układ zapewniający szybkie przeładowanie ładunku bramki tranzystora mocy, co zapewnia szybkie włączanie i wyłączanie tranzystora [4]. Dzięki temu uzyskuje się mniejsze straty energii przy przełączaniu tranzystora oraz minimalizuje niebezpieczeństwo uszkodzenia termicznego tranzystora. Wszystkie sygnały sterujące układami IR2127S oraz zwrotny sygnał błędu poprowadzono za pośrednictwem transoptorów 6n137.

Układ IR2127S wyposażony jest w mechanizm, który umożliwia wykrywanie niepełnego otworzenia kanału sterowanego tranzystora. Jest to istotne z punktu widzenia niezawodności systemu, ponieważ desaturacja tranzystora może świadczyć o jego uszkodzeniu. W tym celu układ mierzy napięcie odłożone między źródłem a drenem tranzystora, kiedy pojemność bramki jest naładowana. Jeżeli napięcie to jest większe od ustalonego progu, układ IR2127S rozładowuje pojemność bramki tranzystora w celu jego wyłączenia oraz ściąga do masy linię /Fault, co skutkuje powiadomieniem jednostki centralnej o zaistniałej sytuacji. Rysunek 7 przedstawia układ IR2127S skonfigurowany do wykrywania desaturacji sterowanego tranzystora. Napięcie progu wykrycia desaturacji jest ustalane przez odpowiedni dobór wartości rezystorów R1, R2 i R3 (wg numeracji na rysunku 7) [5]. W układzie zintegrowanego sterownika osi wartość ta została ustawiona na 8,0V.

Część wykonawcza układu IR2127S jest przeznaczona do zasilania napięciem stałym w odniesieniu do masy przy sterowaniu tranzystorem w dolnej części półmostków, natomiast przy sterowaniu tranzystorem górnej części mostka napięcie zasilania części wykonawczej 2127S musi występować w od-



do pomiaru prądu zjawisko Halla. Dzięki temu uzyskuje się izolację galwaniczną pomiędzy obwodem pierwotnym przetwornika (cewką włączoną w obwód silnika) oraz obwodem wtórnym (czujnikiem pola magnetycznego indukowanego przez przepływ prądu w cewce)[6]. W połączeniu z użyciem transoptorów na liniach sygnałów sterujących stopniem mocy umożliwiło to całkowitą elektryczną izolację części mocy od części sterującej, zapewniającą minimalną ilość zakłóceń docierającą do jednostki centralnej oraz jej ochronę przeciwprzepięciową w przypadku awarii stopnia mocy. Sygnał wyjściowy czujnika HX 15-P to sygnał napięciowy o wartości proporcjonalnej do zmierzonego prądu. Ze względu na pomiar prądu bezpośrednio w obwodzie silnika, występują zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości napięcia sygnału. Z tego względu użyto układu zbudowanego w oparciu o wzmacniacz operacyjny TL072 do przesunięcia oraz przeskalowania sygnału do zakresu wartości akceptowanego przez przetwornik analogowo-cyfrowy mikrokontrolera.

## **Urządzenia wejściowe**

Docelowo wszystkie osie manipulatorów IRp6 miały zostać wyposażone w posiadane enkodery MOK40 1000/1224/BZ/K. Są to enkodery optoelektroniczne wyposażone w wyjścia typu „otwarty kolektor NPN”, o wyjściowym sygnale kwadraturowym z jednym impulsem synchronizacji na obrót wału. Enkodery pracują w środowisku o wysokim stopniu zakłóceń elektromagnetycznych pochodzących z silników szczotkowych. Dla minimalizacji zakłóceń odbieranych przez długie przewody sygnałowe enkoderów oraz dla umożliwienia podciągnięcia linii sygnałowych enkoderów do napięcia zasilania enkoderów +15V w celu zapewnienia większej niezawodności, stan linii enkodera odczytywany jest przez mikrokontroler za pośrednictwem transoptorów 6n137. Podobnie zrealizowany jest odczyt stanu przełączników krańcowych

oraz przełącznika pola synchronizacji.

## **Interfejs użytkownika**

Kartę zintegrowanego sterownika osi wyposażono w trzy przyciski do ręcznego sterowania ruchami osi oraz diody elektroluminescencyjne sygnalizujące stan sterownika. Do sterowania diodami użyto układu MBI5167, który utrzymuje prąd każdej diody na poziomie ustawionym przy pomocy jednego zewnętrznego opornika. Układ ten wyposażony jest w interfejs szeregowy. Każda karta posiada na panelu czołowym również szesnastopozycyjny przełącznik obrotowy, służący do ustawienia adresu karty.

## **Komunikacja**

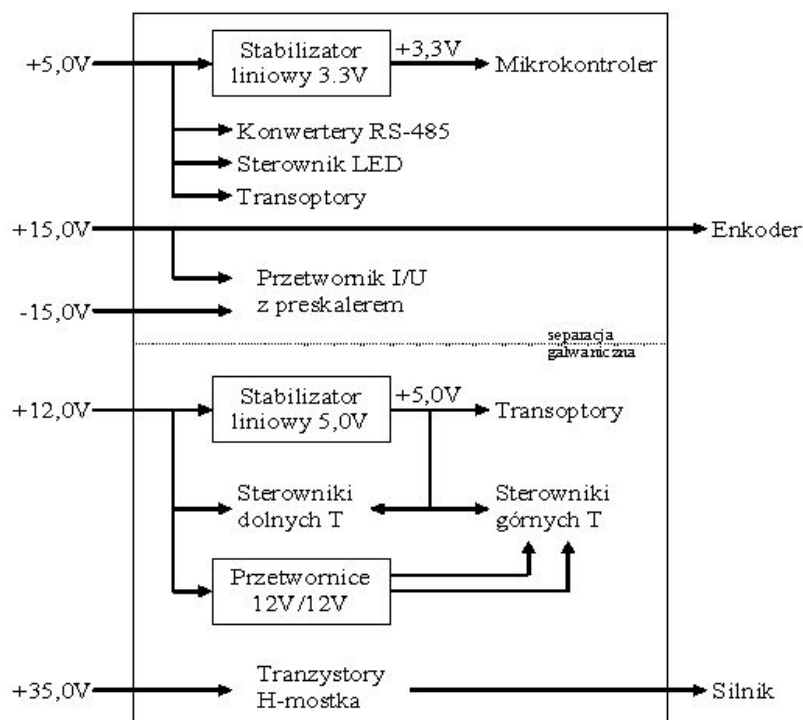
Sterownik osi został wyposażony w dwa interfejsy komunikacji. Główny to RS-422 służący do komunikacji z systemem MRROC++. RS-422 został wybrany ze względu na jego prostotę, odporność na zakłócenia uzyskaną dzięki użyciu sygnałów różnicowych oraz wystarczającą szybkość przesyłu danych. Do komunikacji standardem RS-422 został użyty specjalizowany układ scalony MAX490 o przepustowości danych 2.5Mbps w trybie full duplex. W skład drugiego, pomocniczego interfejsu wchodzi RS-485 używany do programowania mikrokontrolera i uruchamiania funkcji diagnostycznych. Jedna dwuprzewodowa magistrala może zostać przyłączona do wszystkich sterowników osi jednocześnie. Ponadto na wspólnym złączu z wyprowadzeniami interfejsu RS-485 znajduje się wyprowadzenie służące do włączania stopu awaryjnego.

W celach diagnostycznych sterownik osi został wyposażony również w wyprowadzenia umożliwiające wygodne podłączenie sond oscyloskopu do sygnałów takich jak:

- sygnały PWM sterujące stopniem mocy,
- wyjście błędu sterowników IR2127 stopnia mocy,
- wyjście przetwornika prąd/napięcie,
- referencyjny sygnał prostokątny o częstotliwości 20kHz do synchronizacji odczytów przez oscyloskop.

## Zasilanie

Schemat struktury zasilania sterownika osi przedstawiono na rysunku 8. Sterownik do pracy wymaga dostarczenia napięć o następujących warto-



Rysunek 8: Struktura zasilania zintegrowanego sterownika osi

ściach:

- W części sterującej:



- +5.0V dla układów komunikacji, transoptorów oraz sterownika diod świecących. Do tej linii podłączony jest również stabilizator liniowy o napięciu wyjściowym 3,3V, który zasila mikrokontroler.
  - +15V do zasilania enkodera oraz przetwornika prądowo-napięciowego razem ze wzmacniaczem operacyjnym.
  - -15V dla przetwornika prądowo-napięciowego i wzmacniacza operacyjnego.
- W części mocy:
    - +12V do zasilania stopni wyjściowych sterowników tranzystorów górnej części H-mostka za pośrednictwem przetwornic separujących oraz dolnej - bezpośrednio. Z linii +12V energię pobiera również stabilizator o napięciu wyjściowym 5,0V, zasilający transoptory oraz część interfejsową sterowników tranzystorów.
    - +35V (maksymalnie 50V) dla H-mostka sterującego silnikiem.

## **Projekt i przygotowanie do produkcji obwodu drukowanego**

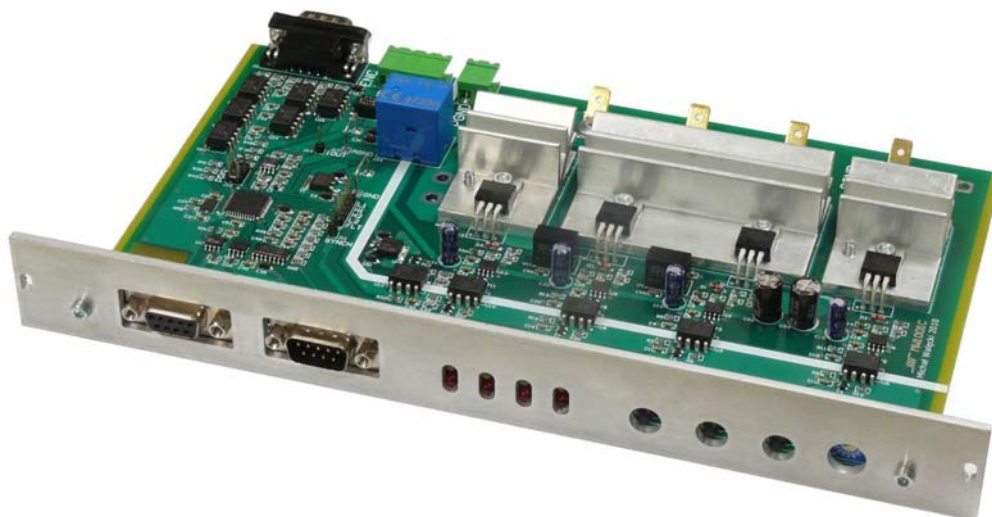
Obwód drukowany został zaprojektowany w technologii dwuwarstwowej. Jest to technologia dobrze rozpowszechniona i tania, wystarczająca do konstrukcji urządzeń umiarkowanie złożonych, w których nie występują sygnały wielkiej częstotliwości.

Zaprojektowaną płytkę zaopatrzone w ramkę technologiczną oraz znaczniki bazujące służące do centrowania warstw nanoszonych kolejno w procesie produkcji obwodu drukowanego. Przy użyciu pakietu Altium Designer wygenerowano pliki stanowiące trwałą dokumentację produkcyjną. W skład dokumentacji wchodzi:

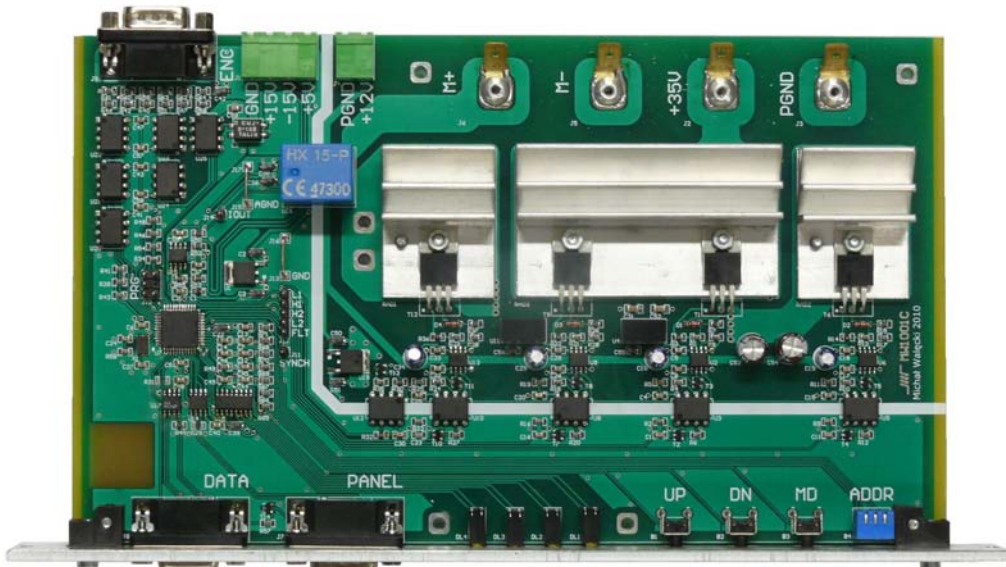
- plik wierceń w formacie EXCELON2.4 - program dla wiertarki numerycznej z informacjami o położeniu i parametrach każdego otworu wierconego w płytce,
- zestaw klisz używanych przy tworzeniu każdej z dwóch warstw miedzi i maski lutowniczej do selektywnego naświetlania emulsji maskującej w procesie fotolitografii,
- klisza do wykonania maski używanej przy nanoszeniu warstwy opisu na płytkę w procesie sitodruku.

## Montaż i uruchomienie

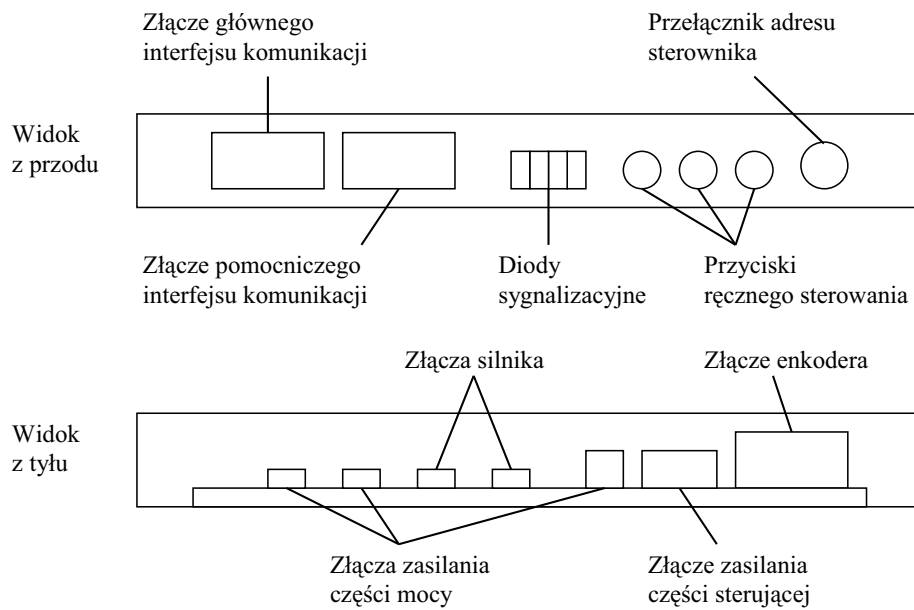
Rysunki 9 oraz 10 przedstawia gotową kartę sterownika, natomiast na rysunku 11 pokazano schemat rozmieszczenia kontrolki i wyprowadzeń na panelu jego czołowym oraz tylnej krawędzi. Płytką drukowaną została wykonana przez firmę Faldruk, elementy elektroniczne zamontowano ręcznie.



Rysunek 9: Zintegrowany sterownik osi, widok na panel czołowy



Rysunek 10: Zintegrowany sterownik osi, widok z góry



Rysunek 11: Rozmieszczenie kontrolki i wyprowadzeń zintegrowanego sterownika osi

Oprogramowanie mikrokontrolera zarządzającego sterownikiem zostało napisane w środowisku MPLAB firmy Microchip w języku C. Dla ułatwienia implementacji programu zarządzającego sterownikiem i regulatorów, w pierwszej kolejności opracowano zespoły funkcji inicjujące mechanizmy niezbędne do pracy mikrokontrolera oraz obsługujące układy peryferyjne. Najważniejsze z nich to:

- Inicjalizacja zegara systemowego. Rodzina mikrokontrolerów dsPIC33 jest wyposażona w system dzielników częstotliwości oraz PLL (phase locked loop - pętlę sprzężenia fazowego służącą do zwielokrotniania częstotliwości). Dzięki wykorzystaniu tego systemu z generatora częstotliwości z zewnątrz zamontowanym rezonatorem kwarcowym o częstotliwości 16MHz uzyskano sygnał zegarowy o częstotliwości 81,143MHz. Jest to częstotliwość taktowania zbliżona do maksymalnej wartości zalecanej przez producenta, przy czym jej wartość pozwala na uzyskanie transmisji szeregowej o szybkości 921600bps obciążonej błędem na poziomie poniżej 0,1%.
- Programowanie pamięci Flash. Sterownik osi wyposażony jest w złącze debuggera/programatora ICD2 firmy Microchip. Debugger pozwala na dokładne prześledzenie programu pracującego na mikrokontrolerze. Kiedy jednak zachodzi potrzeba wymiany programu w kilku sterownikach, wygodniejszą metodą jest połączenie wszystkich sterowników z komputerem pomocniczym interfejsem szeregowym i wgranie nowego programu do odpowiednio zaadresowanego mikrokontrolera. Sterowniki są identyfikowane przez adresy ustawiane za pomocą przełącznika obrotowego na panelu czołowym. Do programowania pamięci Flash użyto zmodyfikowanego bootloadera DS30 Loader[7].

- Obsługa interfejsu szeregowego głównego - czteroprzewodowego RS-422, służącego do komunikacji z systemem komputerowym. Szybkość transmisji zaprogramowano na 921600bps. Jest to maksymalna szybkość możliwa do uzyskania przez ośmioportową kartę interfejsu RS-422 Moxa CP-138U-I, która została zamontowana w komputerze w celu komunikacji ze sterownikami osi. Ze względu na wymóg częstego przesyłania danych między komputerem a sterownikami osi (polecenia dla sterownika i odpowiedzi do komputera przesyłane w cyklach 2ms) do odbioru poleceń wykorzystano system przerwań mikrokontrolera dsPIC, a do wysyłania odpowiedzi mechanizm bezpośredniego dostępu do pamięci (DMA). Dzięki temu występuje natychmiastowa reakcja na otrzymane polecenie, a działanie głównego programu może odbywać się równolegle z wysyłaniem wcześniej przygotowanej odpowiedzi. Polecenie dla sterownika ma stałą długość 6 bajtów i składa się z następujących elementów:

- bajt startu
- bajt zawierający informacje o trybie pracy (regulator położenia, regulator prądu, tryb ręczny, PWM lub synchronizacja)
- 4-bajtową wartość referencyjną pozycji, prądu lub wypełnienia sygnału PWM - w zależności od wybranego trybu.

Komunikat zwrotny zawiera:

- bajt startu
- bajt, którego bity informują o:
  - \* stanie górnego przełącznika krańcowego,
  - \* stanie dolnego przełącznika krańcowego,

- \* stanie przełącznika pola synchronizacji,
  - \* wystąpieniu sygnału synchronizacji enkodera,
  - \* błędzie lub braku zasilania stopnia mocy,
  - \* zadziałaniu ograniczenia prądowego,
  - \* przejściu w tryb ERROR,
  - \* zakończeniu synchronizacji,
- 2-bajtowy wynik pomiaru prądu silnika,
  - 4-bajtową wartość pozycji osi.
- Obsługa interfejsu szeregowego pomocniczego - dwuprzewodowego RS-422. Interfejs służy do komunikacji z komputerem przy pomocy terminala tekstowego w celach diagnostycznych oraz do wymiany oprogramowania sterownika osi. Uruchomiony został z prędkością 38400bps. Komunikacja interfejsem pomocniczym przebiega w trybie tekstowym, a składnia komunikatów jest zgodna ze standardem SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) [8].
  - Obsługa enkodera. Dzięki wykorzystaniu dedykowanego mechanizmu sprzętowego mikrokontrolera śledzenie przyrostu pozycji wału enkodera odbywa się bez udziału rdzenia i przerywa działanie głównego programu jedynie w przypadku przepełnienia sprzętowego licznika.
  - Kontrola stopnia mocy. Do sterowania załączaniem odpowiednich gałęzi H-mostka użyto sprzętowego generatora sygnału prostokątnego o zmiennym wypełnieniu (PWM). Wypełnienie jest regulowane w zakresie 0-100% z dokładnością do 0.1%. Częstotliwość sygnału ustawiono na 20kHz, dzięki czemu drgania cewek silników nie są słyszalne. Wykorzystano mechanizm wyzwalania przetwornika analogowo-cyfrowego

przez generator PWM, dzięki czemu w prosty sposób uzyskano pomiar prądu silnika dokładnie w połowie czasu jego narastania. Pozwala to na szybki odczyt średniej wartości prądu w pojedynczym cyklu generatora PWM bez użycia filtru całkującego, który wprowadzałby opóźnienie.

- Interfejs użytkownika. Naciśnięcie przycisku na panelu czołowym powoduje ustawienie przez mechanizm sprzętowy flagi informującej o zmianie stanu wejść mikrokontrolera. Sygnalizuje ona w programie konieczność odczytania stanu wejść odpowiadających przyciskom. Interfejs szeregowy układ MBI5167 sterującego diodami został zrealizowany programowo.

W głównej pętli programu sprawdzane są flagi:

- naciśnięcia przycisku,
- otrzymania przez komunikatu przez interfejs pomocniczy,
- upłynięcia czasu przytrzymania sygnału stopu awaryjnego w stanie wysokim,
- upłynięcia okresu, co który ustawiany jest stan diod LED na panelu.

Wykrycie wysokiego stanu jednej z flag powoduje wywołanie odpowiedniej procedury obsługi. Pozostałe funkcje sterownika zrealizowane są przy wykorzystaniu systemu obsługi przerwań oraz sprzętowych mechanizmów mikrokontrolera.

W mikrokontrolerze zaimplementowano dwa regulatory proporcjonalno-całkująco-różniczkujące (PID). Są to: regulator położenia osi oraz regulator prądu silnika. Regulatory mają możliwość pracy samodzielnej lub pracować w układzie kaskadowym.

Zintegrowany sterownik osi ma możliwość pracy w następujących trybach:

1. MANUAL - sterowanie ręczne. Jest to tryb, w którym włącza się sterownik. Do poruszania silnikiem osi w kierunku dodatnim i ujemnym służą odpowiednio przyciski 1 i 2 na panelu czołowym. Wypełnienie sygnału PWM sterującego H-mostkiem wynosi 20%. Jeżeli sterownik wykrył zadziałanie jednego z przełączników krańcowych osi, umożliwia ruch tylko w takim kierunku, aby przełącznik ten został zwolniony.
2. PWM - zadane wypełnienie. Ten tryb zapewnia zgodność zintegrowanego sterownika osi ze starymi sterownikami, które pracowały wyłącznie w tym trybie. Kierunek ruchu oraz wypełnienie sygnału PWM dla stopnia mocy jest bezpośrednio ustawiany z komputera.
3. POSITION - regulator pozycji. Do sterownika osi wysyłane są z komputera zadane wartości położenia osi. Oprogramowanie sterownika, w zależności od konfiguracji, za pomocą regulatora położenia lub kaskadowego regulatora położenia dąży do uzyskania zadanego położenia.
4. CURRENT - regulator prądu. Do sterownika wysyłane są zadane wartości prądu silnika dla regulatora prądowego.
5. ERROR - wykryto błąd. Tryb ten uruchamiany jest przez sterownik w przypadku wykrycia stanu wysokiego sygnału przełącznika krańcowego, który może świadczyć o położeniu osi poza dopuszczalnym zakresem. Z tego trybu możliwe jest przejście tylko do trybu ruchów ręcznych, przez wciśnięcie przycisku 3 na panelu czołowym sterownika.
6. BOOT - tryb programowania. Uruchamiany jest poleceniem wysłanym przez pomocniczy interfejs szeregowy. Mikrokontroler po włączeniu tego trybu włącza stop awaryjny szafy sterowniczej, po czym resetuje się i przechodzi do ładowania do pamięci Flash nowego programu



przesyłanego pomocniczym interfejsem szeregowym z komputera.

W tablicy 2 przedstawiono zestawienie parametrów opracowanego zintegrowanego sterownika osi oraz starego sterownika. W porównaniu do starego sterownika zmniejszono osiągalny okres cyklu komunikacji, ustawiono częstotliwość sygnału PWM sterującego stopniem mocy poza zakresem słyszalnym przez człowieka oraz wprowadzono możliwość zamknięcia pętli regulacji prądu i pozycji przez regulatory zaimplementowane w sterowniku. Częstotliwość pracy regulatorów zintegrowanego sterownika osi jest wyższa zarówno od oferowanej przez dotychczasowe sterowniki, jak i dostępne w rozwiązaniach komercyjnych (tablica 1).

	Zintegrowany sterownik osi	Stary sterownik osi
Napięcie zasilania	12..50V DC	35..50V DC
Max. ciągły prąd silnika	30A	30A
Regulator pozycji	tak, 1kHz	z pętlą zamkniętą przez system MRROC++, 500Hz
Regulator prądu	tak, 20kHz	nie
Częst. przełączania	20kHz	ok. 10kHz
Interfejs	RS-422	ISA
Cykl komunikacji	min. 1ms	2ms

Tablica 2: Porównanie wybranych parametrów nowych i starych sterowników osi

## 4.2 Instalacja szafy sterowniczej

Obok zintegrowanych sterowników osi, od podstaw zaprojektowano również instalację elektryczną szafy sterowniczej. Jej schemat elektryczny znajduje się w załączniku 2. Podstawową zmianą w stosunku do oryginalnej konstrukcji było umieszczenie sterowników osi oraz obwodów zasilania dla obydwu mani-

pulatorów w jednej szafie sterowniczej zamiast w dwóch. Rysunek 12 przedstawia nową instalację szafy sterowniczej robotów IRp6, z zainstalowanym zestawem sterowników osi do jednego manipulatora. Jedynymi komponentami,



Rysunek 12: Wnętrze szafy sterowniczej robotów IRp6

które pozostały w niezmienionej formie, jest zespół trzech transformatorów oraz trójfazowy mostek prostowniczy. Tworzą one układ zasilania H-mostków w stopniach mocy sterowników osi. Do zasilania pozostałych komponentów

szafa została wyposażona w zasilacze impulsowe z serii DR firmy MeanWell. Dostarczeniem mocy do odpowiednich obwodów zarządza zespół styczników. Obwody zasilania zostały podzielone na następujące sekcje:

- ZAS - sekcja zasilania zespołu styczników oraz zasilaczy zamontowanych w szafie sterowniczej, załączana za pomocą stacyjki.
- LOG1 - sekcja zasilania części sterującej zintegrowanych sterowników osi pierwszego manipulatora. Po przekręceniu kluczyka w stacyjce sekcja ta jest wyłączona, należy ją załączyć naciskając przycisk „LOG1” na panelu czołowym szafy.
- MOC1 - sekcja zasilania części mocy zintegrowanych sterowników osi pierwszego manipulatora. Włączenie tej sekcji możliwe jest tylko po uprzednim włączeniu sekcji LOG1. Po włączeniu sekcji LOG1 sekcja MOC1 jest wyłączona - znajduje się w stanie tzw. stopu awaryjnego. Aby ją załączyć, należy nacisnąć przycisk „KAS1” (kasowanie stopu awaryjnego), co spowoduje dostarczenie zasilania do transformatorów, a następnie nacisnąć przycisk „MOC1”, który załączy zasilanie w sekcji MOC1. Naciśnięcie przycisku „STOP1” lub przerwanie przez dowolny ze sterowników osi pierwszego manipulatora obwodu stopu awaryjnego spowoduje natychmiastowy powrót sekcji MOC1 do stanu stopu awaryjnego. Powoduje to odcięcie zasilania części mocy sterowników osi.
- LOG2 i MOC2 są sekcjami zasilania sterowników osi drugiego manipulatora, sterowanymi analogicznie do LOG1 i MOC1 przy pomocy identycznego zestawu przycisków „LOG2”, „KAS2”, „MOC2”, „STOP2” oraz obwodu stopu awaryjnego drugiego manipulatora. Do transformatorów dostarczone jest zasilanie, jeśli przynajmniej jeden z manipulatorów nie znajduje się w stanie stopu awaryjnego.

Szafa sterownicza posiada wyprowadzenia w postaci kostki przyłączeniowej do podłączenia zdalnego panelu przycisków sterujących oraz przycisków stopu awaryjnego.

## 5 Wdrożenie systemu

Pomimo opisanych w poprzednich rozdziałach problemów, jakie sprawiał system robotyczny, obydwa manipulatory IRp6 będące na wyposażeniu Laboratorium Robotyki Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej były stale w użyciu. Aby zminimalizować okres czasu, przez który system będzie nieczynny, postanowiono prototyp zintegrowanego sterownika osi uruchomić i zaprogramować, używając stanowiska badawczego nazywanego potocznie „Sarkofagiem”. Stanowisko składa się z obrotowego ramienia, do którego można mocować obciążniki, zamkniętego w przeszklonej obudowie (rysunek 13). Ramię napędzane jest za pośrednictwem przekładni takim samym silnikiem, jakie są zamontowane w robotach IRp6. Sarkofag, z powodu problemów technicznych z układem sterowania, był od dawna nieczynny i świetnie nadawał się jako stanowisko do bezpiecznego testowania nowego sterownika. Do tego celu w Sarkofagu wymieniono rezolwer oraz prądnicę tachometryczną na enkoder optoelektroniczny - taki sam, jak te, które zostały zakupione do manipulatorów oraz wymontowano z szafki sterowniczej stare układy sterowania, robiąc miejsce dla nowego sterownika. W trakcie prac nad oprogramowaniem sterownika osi dokonano również niewielkich modyfikacji układu elektrycznego sterownika. Równolegle opracowano klasę interfejsu nowego sterownika przeznaczoną dla systemu MRROC++.

Po zakończeniu prac nad sterownikiem i pomyślnym przejściu testów polegających na pięciogodzinnej bezustannej pracy Sarkofagu pod kontrolą MRROC++ podjęto decyzję o produkcji 9 sztuk zintegrowanych sterowni-



Rysunek 13: Stanowisko badawcze „Sarkofag”

ków osi - ośmiu dla jednego z manipulatorów oraz jednego rezerwowego, do umieszczenia w Sarkofagu. W czasie trwania produkcji obwodów drukowanych sterowników na bazie szyn TS-35 przykręconych do blachy aluminiowej zbudowano instalację do zamontowania w szafie sterowniczej. Dopiero kiedy zamontowano elementy elektroniczne na kartach wszystkich sterowników, wyłączono szafę jednego z manipulatorów i rozpoczęto jej rozbiórkę.

Po wymianie instalacji w szafie sterowniczej i umieszczeniu w niej zestawu zintegrowanych sterowników osi zmodyfikowano klasę interfejsu komunikacji dla systemu MRROC++ tak, aby możliwa była jednoczesna komunikacja z wieloma sterownikami osi.

Tak przygotowany system sterowania manipulatorem uruchomiono i prze-

testowano pod kątem:

- poprawnej synchronizacji osi manipulatora,
- poprawnego działania regulatora pozycji z pętlą sprzężenia zamkniętą w systemie MRROC++, wykorzystującego tryb PWM sterownika,
- reakcji wyłączeniem sekcji zasilania stopni mocy w przypadku zadziałania jednego z przełączników krańcowych manipulatora lub wciśnięcia przycisku stopu awaryjnego.

## 6 Podsumowanie

Zadaniem autora było opracowanie sprzętowego systemu sterowania manipulatorami przemysłowymi IRp6. Zadanie obejmowało projekt i wykonanie elektronicznych sterowników osi zintegrowanych ze stopniami mocy oraz projekt i wymianę instalacji szafy sterowniczej.

W ramach prac został przeprowadzony kompletny proces produkcyjny zintegrowanych sterowników osi - od opracowania schematu elektrycznego przez wykonanie prototypu, implementację regulatorów, opracowanie interfejsu komunikacji ze sterownikami dla systemu MRROC++, testowanie sterownika na stanowisku badawczym, po przygotowanie dokumentacji produkcyjnej dopracowanej wersji urządzenia. Szafa sterownicza została wyposażona w nową instalację elektryczną oraz zestaw sterowników osi do sterowania jednym manipulatorem.

System został uruchomiony i spełnia postawione wymagania. Jeżeli w najbliższych tygodniach nie pojawią się problemy z pracą manipulatora, szafa sterownicza zostanie doposażona w zestaw sterowników dla drugiego manipulatora. Cały system robotyczny złożony z dwóch manipulatorów IRp6

będzie działał pod kontrolą opracowanego sterownika. Wtedy również zostaną włączone do użytku regulatory prądu i położenia zaimplementowane w zintegrowanych sterownikach osi.

## Literatura

- [1] C. Zielinski, W. Szykiewicz, T. Winiarski, T. Kornuta, „MRROC++ Based System Description. Technical Report 06-9”, IAIS, Warszawa, 2006
- [2] C. Zielinski, T. Winiarski, W. Szykiewicz, M. Staniak, W. Czajewski, T. Kornuta, „MRROC++ Based Controller of a Dual Arm Robot System Manipulating a Rubik’s Cube. Technical Report 06-10”, IAIS, Warszawa, 2006
- [3] Andrzej Rydzewski, „Dokumentacja do sterowników osi robota IRp-6 o 5-ciu stopniach swobody”, IAIS, Warszawa, 2003
- [4] International Rectifier, „IR2127(S) / IR2128(S) / IR21271(S) Current sensing single channel driver”
- [5] International Rectifier, Application Note AN-1014, „Using The Current Sensing IR212X Gate Drive ICs”
- [6] LEM, „Current Transducer HX 03..50-P”
- [7] DS30 Loader - Open source bootloader for PIC16, PIC18, PIC24, and dsPIC’, <http://mrmackey.no-ip.org/elektronik/ds30loader/index.php>
- [8] SCPI Consortium, „Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) Volume 1: Syntax and Style”, 1999



## Spis załączników

1. Schemat elektryczny zintegrowanego sterownika osi
2. Schemat elektryczny nowej instalacji szafy sterowniczej manipulatorów IRp6