

Marek PACHUTA
Przemysłowy Instytut
Automatyki i Pomiarów PIAP
W a r s z a w a

BUDOWA UKŁADU NAPĘDOWEGO ROBOTÓW OPRACOWANYCH W PIAP. STAN OBECNY I TENDENCJE ROZWOJU

W artykule przedstawiono rozwój układów napędowych stosowanych w robotach przemysłowych opracowanych w PIAP. Omówiono też tendencje występujące w serwonapędach elektrycznych. Opisano sterowanie silników z komutacją elektroniczną oraz koncepcję napędu autonomicznego.

1. WSTĘP

W połowie lat osiemdziesiątych opracowany został w PIAP układ sterowania robotów przemysłowych IRp-6/60. Powstał on w ramach prac rozwojowych nad robotami IRb-6/60, na które została zakupiona licencja w szwedzkiej firmie ASEA. Następnym krokiem było opracowanie w 1991 roku całkowicie nowego układu sterowania o symbolu URP o dużym uproszczeniu struktury, zwiększeniu niezawodności i zastąpieniu układów analogowych układami cyfrowymi w części napędowej.

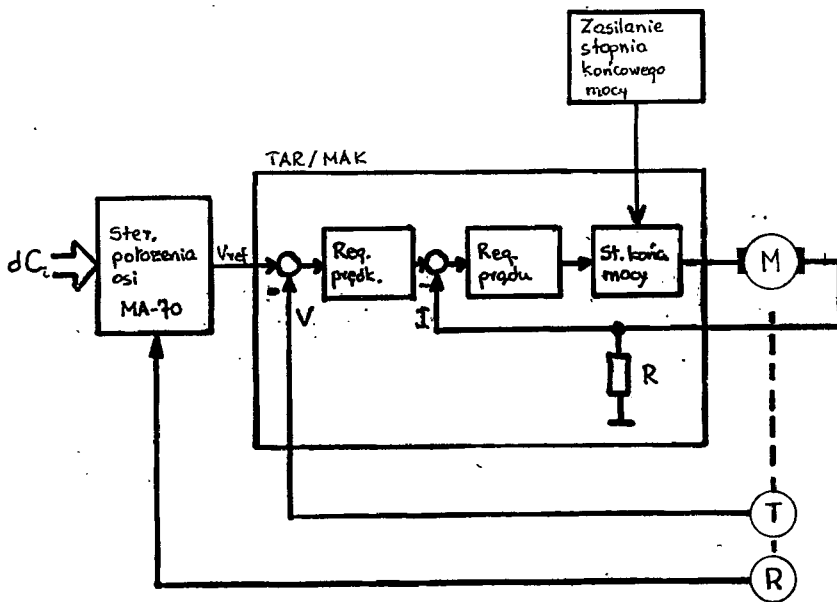
Układy napędowe są ważnym elementem składowym układu sterowania robotów przemysłowych. Są one odpowiedzialne za dokładność, przebiegi dynamiczne i niezawodność pozycjonowania części manipulacyjnej. Elementami wykonawczymi układu napędowego zakupionego w Szwecji robota były silniki elektryczne prądu stałego. Ten typ silników zachowany został także przy późniejszych pracach prowadzonych w PIAP nad unowocześnieniem robotów IRb. Wyniki tych prac, dotyczące układów napędowych, przedstawiono w rozdziale 2 i 3 niniejszego artykułu.

Prace nad układami napędowymi w PIAP nie ograniczyły się jedynie do serwomechanizmów z silnikami prądu stałego z komutacją mechaniczną. Przeprowadzone zostały również badania nad regulacją silników z komutacją elektroniczną, co opisane zostało w rozdziale 4.1. W związku z rozwojem w przodujących firmach na świecie tzw. napędów autonomicznych, coraz częściej wykonywanych całkowicie w technice cyfrowej,

w PIAP przewiduje się opracowanie takiego napędu, bazując na doświadczeniach wyniesionych przy konstruowaniu układów napędowych robotów, co przedstawione zostało w rozdziale 4.2.

2. BUDOWA UKŁADU NAPĘDOWEGO ROBOTÓW IRp

Układ regulacji napędów w robotach IRp jest typowym układem, w którym można wyróżnić 3 pętle regulacji — regulację położenia, prędkości i prądu (rys. 1). Regulacja



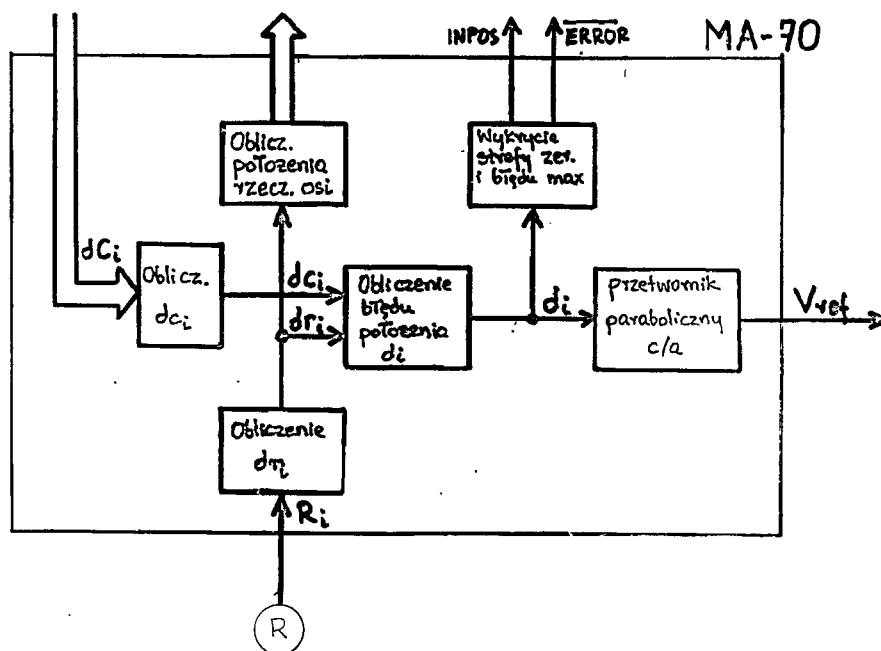
Rys. 1. Schemat blokowy serwonaświetu w robotach IRp: M — silnik, T — prądnicza tachometryczna, R — rezolwer.

położenia realizowana jest cyfrowo, natomiast regulatory prędkości i prądu znajdują się w analogowym sterowniku mocy, w skład którego wchodzi także stopień końcowy mocy. W zależności od typu robota (IRp-6 lub IRp-60) różne są wykonania sterowników mocy. Inne są także silniki, którymi poruszana jest część manipulacyjna — w przypadku robota IRp-6 jest to silnik prądu stałego z magnesami trwałymi typu PZTK 88-35 TRR o momencie 0,55 Nm, maksymalnej prędkości 3200 obr./min, napięciu znamionowym 35 V i maksymalnym prądzie 18 A. W robocie IRp-60 zastosowano silnik typu PZTK 13-07 o momencie 3,2 Nm, maksymalnej prędkości 3400 obr./min, znamionowym

napięciu pracy 90 V i maksymalnym prądzie 52 A (w impulsie). Miernikiem położenia jest transformator położenia kąтового (rezolwer), natomiast prędkość mierzona jest za pomocą prądnicy tachometrycznej.

2.1. Regulator położenia — sterownik położenia osi MA-70

Regulator położenia znajduje się na oddzielnym pakiecie układu sterowania, jest układem cyfrowym i nosi nazwę sterownika położenia osi o symbolu MA-70. Stanowi on



Rys. 2. Schemat blokowy sterownika MA-70 położenia osi

interfejs pomiędzy nadrzędną jednostką centralną, sterującą systemem a sterownikiem mocy. Sterownik MA-70 zbudowany jest na mikroprocesorze 8080, którego pracę określa program zapisany w pamięci stałej. Z nadrzędnej jednostki centralnej przyjmuje on 16-bitowe słowo dC_i , określające żądany przyrost ruchu w zadanym przedziale czasu, który może wynosić 8, 16, 32 lub 64 ms (rys. 2). Minimalna wartość przyrostu odpowiada 1/256 obrotu wału silnika. Z rezolwera sterownik przyjmuje co 1 ms informację R_i , o rzeczywistym położeniu wału silnika dokładność odczytu wynosi 1/1024 obrotu wału

silnika). Na podstawie obu tych informacji mikroprocesor oblicza wartość błędu położenia d_p . Ta wartość jest z kolei podstawą do obliczenia wartości zadanej prędkości V_{ref} , będącej analogowym sygnałem wyjściowym ze sterownika. Wartość tego sygnału zawiera się w przedziale -10 V do $+10\text{ V}$, przy czym znak określa kierunek ruchu. Zależność tego napięcia od błędu położenia jest funkcją drugiego stopnia (parabola). Jej kształt jest różny dla robota IRp-6 i IRp-60.

Ponieważ sygnał z rezolwera zawiera informację jedynie o aktualnym położeniu wału silnika w zakresie 1 obrotu, a nie o położeniu osi sterowanej tym silnikiem (zakres ruchu osi składa się z wielu obrotów wału silnika), dlatego po włączeniu układu sterowania należy osi zsynchronizować. Rozkaz synchronizacji podawany jest przez nadrzędną jednostkę centralną oddzielnym sygnałem. Proces synchronizacji wykonuje sterownik położenia osi samodzielnie. Polega on na ruchu danej osi w zadanym kierunku do momentu, gdy nadejdzie sygnał z przełącznika synchronizacji zainstalowanego na robocie, oraz sygnał z rezolwera znajdzie się w fazie z sygnałem odniesienia SINREF. Po zsynchronizowaniu mikroprocesor zeruje rejestr położenia rzeczywistego. Stan tego 16-bitowego rejestru po synchronizacji uaktualniany co 1 ms. Określa on położenie osi robota z dokładnością $1/256$ obrotu wału silnika. Sterownik informuje nadrzędną jednostkę centralną sygnałem INPOS, że błąd położenia mieści się w strefie zerowej, a sygnałem ERROR, że błąd ten przekroczył dopuszczalną wartość.

2.2. Regulator prędkości i prądu — sterowniki mocy

Regulatory prędkości i prądu znajdują się w zespołach sterowników mocy produkcji Instytutu Elektrotechniki oznaczonych symbolami TAR-1-A (dla IRp-6) i MAK-1 (dla IRp-60). Oba te sterowniki są zbudowane przy zastosowaniu układów analogowych.

2.2.1. Sterownik TAR 1-A

W sterowniku TAR 1-A znajdują się dwa regulatory (rys. 1). Pierwszy z nich — regulator prędkości — porównuje sygnał prędkości zadanej ze sterownika położenia z sygnałem prędkości rzeczywistej z prądnicy tachometrycznej. Sygnał wyjściowy regulatora determinowany tą różnicą jest sygnałem zadającym prąd silnika. Regulator prędkości posiada charakterystykę regulacyjną typu PI.

Napięcie zadające prąd silnika z regulatora prędkości porównywane jest z napięciem proporcjonalnym do prądu silnika otrzymywanym z rezystora pomiarowego włączonego szeregowo z silnikiem. Różnica ta jest wzmacniana we wzmacniaczu mającym charakterystykę typu PI (regulator prądu). Sygnał wyjściowy regulatora steruje układem

modulatora. Modulator ma za zadanie przekształcenie tego sygnału na ciąg impulsów o regulowanym wypełnieniu (PWM), kluczujących tranzystory mocy z częstotliwością 4 kHz.

Stopień wyjściowy mocy zbudowany jest z biopolarnych tranzystorów mocy tworzących układ mostkowy. Silnik włączony jest w przekątną mostka, co umożliwia uzyskanie obu kierunków wirowania. Stopień wyjściowy zasilany jest napięciem +47 V i można na nim uzyskać maksymalny prąd wyjściowy równy 15 A.

Sterownik mocy TAR posiada następujące układy dla realizacji funkcji ochronnych:

- układ synchronizacji nadprądowej działający, gdy sygnał zadający prądu przekracza dopuszczalną wartość przez 3-5 sek,
- układ ograniczenia prądu silnika o 50%,
- układ blokady regulatora prędkości stosowany, gdy wyłączony jest stopień wyjściowy mocy (w stanie GOTOWOŚĆ robota).

2.2.2. Sterownik MAK-1

Sterownik MAK-1 posiada podobnie jak TAR 1-A dwa regulatory — prędkości i prądu, oba typu PI. Wyjście z regulatora prądu steruje generatorem impulsów wzwalających, służących do fazowego sterowania przekształtnika tyrystorowego.

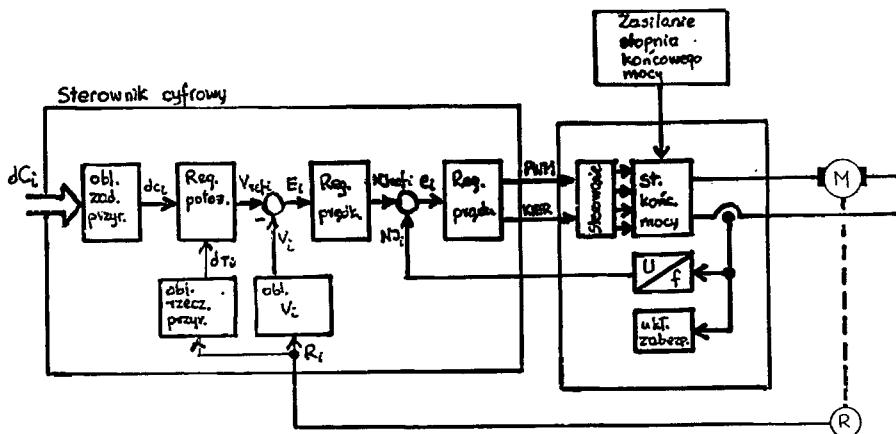
Sterownik MAK-1 posiada następujące układy zabezpieczające:

- układ ograniczenia prądu,
- układ limitujący prąd maksymalny,
- układ blokady regulatora w stanie GOTOWOŚĆ.

3. STEROWNIK CYFROWY — CZĘŚĆ SKŁADOWA NOWEGO UKŁADU STEROWANIA

W 1991 roku opracowany został w PIAP nowy układ sterowania robotów przemysłowych. Część elektroniczna ulokowana jest na pakietach spełniających wymagania systemu AMS-M (SIEMENS), znajdujących się w specjalnej kasecie i połączonych magistralą.

Za ruch poszczególnych osi robota odpowiedzialny jest sterownik cyfrowy MV20. Realizuje on funkcje wykonywane w robotach IRp przez sterownik położenia osi MA-70 i sterownik mocy (TAR lub MAK). Stopień końcowy mocy stanowi oddzielną jednostkę i znajduje się poza kasetą systemu AMS. Jeden sterownik ze stopniem końcowym mocy steruje jednym silnikiem prądu stałego. Ideowy schemat blokowy całego serwonapędu ze



Rys. 3. Schemat blokowy serwonaędu cyfrowego w układzie sterowania robotów URP sterownikiem cyfrowym przedstawiony został na rys. 3.

Potrzeba opracowania sterownika cyfrowego wynika z:

- konieczności zmniejszenia liczby zespołów oraz ich gabarytów, co pozwala na umieszczenie w szafie układu sterowania układów regulacji dla dziewięciu osi,
- potrzeby częściowego zunifikowania konstrukcji układów regulacji dla różnych typów robotów,
- potrzeby uproszczenia prac przygotowawczych (zestrojenia) układu napędowego po zamontowaniu w szafie robota,
- potrzeby zwiększenia powtarzalności parametrów dla każdego egzemplarza robota (wylimitowanie wpływu zmian temperatury na nastawy regulatorów),
- zmniejszenia poboru mocy przez zastosowanie nowoczesnych układów elektronicznych.

3.1. Budowa sterownika cyfrowego

Sterownik cyfrowy MV20 znajduje się na jednej płycie systemu AMS-M o wymiarach 160 x 233, a sygnały wychodzące na magistralę kasety spełniają wymagania systemu. Sterownik stanowi 16-bitowy układ we/wy dla jednostki centralnej sterującej całym układem sterowania. Jego centralną częścią jest mikroprocesor INTEL 80C186, którego pracę określa program umieszczony w pamięci EPROM o pojemności 16 kB, z możliwością rozszerzenia do 32 kB. Program ten obejmuje obsługę we/wy z otoczenia (magistrala AMS, czujniki położenia, prędkości i prądu, stopień końcowy mocy) oraz realizację

algorytmów regulacji dla regulatorów położenia, prędkości i prądu. Wszelkie zmienne przechowywane są w pamięci RAM o pojemności 16 kB, natomiast parametry regulacji wyznaczone indywidualnie dla każdego obiektu zapisywane są do pamięci EEPROM, której zawartość nie jest tracona podczas zaniku napięcia zasilania. Zapisu do tej pamięci można dokonać za pomocą panelu operacyjnego będącego częścią składową układu sterowania robota i służącego normalnie do programowania ruchów manipulatora.

Wszystkie sygnały wejściowe i wyjściowe pakietu, przechodzące przez złącza obiektowe na jego płycie czołowej są oddzielone galwanicznie w celu zwiększenia odporności sterownika na zakłócenia. Zastosowanie czterowarstwowego druku umożliwiło większe upakowanie elementów elektronicznych na pakiecie oraz zwiększyło odporność na zakłócenia elektromagnetyczne (KEM).

Działanie wszystkich bloków sterownika cyfrowego określa program sterownika i odtwarza on praktycznie pracę układów elektronicznych zainstalowanych na sterowniku położenia MA-70 i sterowniku mocy TAR/MAK robotów IRp, dając dodatkowe możliwości. Oprócz zmniejszenia gabarytów, cyfrowe układy regulacji wykazują w stosunku do analogowych szereg technicznych zalet. Regulatory analogowe zbudowane są przy użyciu wzmacniaczy operacyjnych realizujących, w połączeniu z elementami biernymi, zadaną funkcję regulacji. W celu zrealizowania algorytmów najczęściej stosowanych regulatorów typu PI lub PID, wzmacniacz operacyjny obudowuje się układami RC. Działanie takiego regulatora jest zależne od dokładności zastosowanych rezystorów i kondensatorów. Obok niedokładności elementów, na pracę regulatorów analogowych ma wpływ zmiana parametrów elementów analogowych w czasie i wraz ze zmianą temperatury. Zmiana nastaw regulatorów tego typu jest utrudniona i czasochłonna, ponieważ polega na wylutowywaniu elementów. W przypadku zmiany nastaw za pomocą potencjometrów traci się kontrolę nad ich wartością, a co za tym idzie — nie można ich udokumentować ani dokładnie odtworzyć stosując inny egzemplarz regulatora.

Cyfrowa koncepcja regulatorów omija wyżej wymienione wady i ograniczenia, ponieważ algorytmy regulacji są w tym przypadku realizowane nie za pomocą wzmacniaczy operacyjnych, a przez program wykonywany przez procesor. Przejście na ten typ regulacji daje wiele zalet. Do najważniejszych należą:

- możliwość realizacji algorytmów niemożliwych do wykonania w prosty sposób przez układy analogowe, np. algorytmy regulatorów adaptacyjnych z automatycznym doбором nastaw,
- łatwość zmiany wartości nastaw regulatorów,
- powtarzalność i stałość parametrów regulacji,
- łatwość realizacji wpływu zewnętrznych sygnałów na regulację,

- zwiększenie dokładności regulacji i jej zakresu,
- możliwość komunikacji z komputerami sterującymi całym procesem, w którym zastosowany jest napęd lub też z innymi układami napędowymi.

3.2. Pomiar położenia i prędkości

Porównując rysunki 1 i 3 można stwierdzić, że w przypadku stosowania sterownika cyfrowego MV20 wyeliminowana została prądnica tachometryczna. Jest ona zwykle zamontowana na wirniku silnika i służy do pomiaru prędkości, przy czym informacja o wartości prędkości ma postać analogową. W sterowniku cyfrowym dla obliczenia wartości prędkości zastosowany został rezolwer, służący również do pomiaru położenia wirnika silnika.

Sygnałem wejściowym regulatora położenia jest błąd położenia d_t , którego wartość obliczana jest za pomocą wyrażenia:

$$d_t = d_{t-1} + d_{ct} - d_{rt}$$

gdzie:

d_{ct} — zadany przyrost ruchu określony przez nadrzędną jednostkę centralną, który ma być wykonany w czasie jednego cyklu pracy regulatora $T = 2$ ms.

d_{rt} — rzeczywisty przyrost ruchu wykonywany w czasie jednego cyklu

Odczyt położenia wirnika R_t dokonywany jest z dokładnością 1/4096 jego obrotu co 2 ms.

Przyrosty ruchu d_{ct} oraz d_{rt} obliczane są natomiast z dokładnością 1/1024 obrotu wirnika. Stąd:

$$d_{rt} = \frac{R_t}{4} - \frac{R_{t-1}}{4}$$

Program uwzględnia przy tym skokowe zmiany wartości odczytu R_t związane z kolejnymi obrotami wirnika.

Nadrzędna jednostka centralna znajdująca się w kasecie systemu AMS steruje ruchami wszystkich silników napędzanych poprzez sterowniki cyfrowe. Rozkazy ruchu dC_t do poszczególnych sterowników przekazywane są przez magistralę w transmisji równoległej w postaci słów 16-bitowych. Słowo dC_t określa zadany przyrost ruchu jaki

ma być wykonany przez silnik w czasie $N = 8, 16, 32$ lub 64 ms, stąd zadany przyrost ruchu dc_i , który ma być wykonany w czasie jednego cyklu pracy T regulatora położenia wynosi:

$$dc_i = \frac{dC_i}{N} \cdot T$$

Sygnałem wyjściowym z regulatora położenia jest wartość zadana prędkości V_{refi} . Porównywany jest on z prędkością rzeczywistą V_i , a różnica obu tych wielkości:

$$E_i = V_{refi} - V_i$$

jest sygnałem, wyjściowym regulatora prędkości.

Pomiar prędkości dokonywany jest przez okresowy ($T = 2$ ms) odczyt położenia wirnika z dokładnością $1/4096$ obrotu (przyrost rezolwera). Stąd:

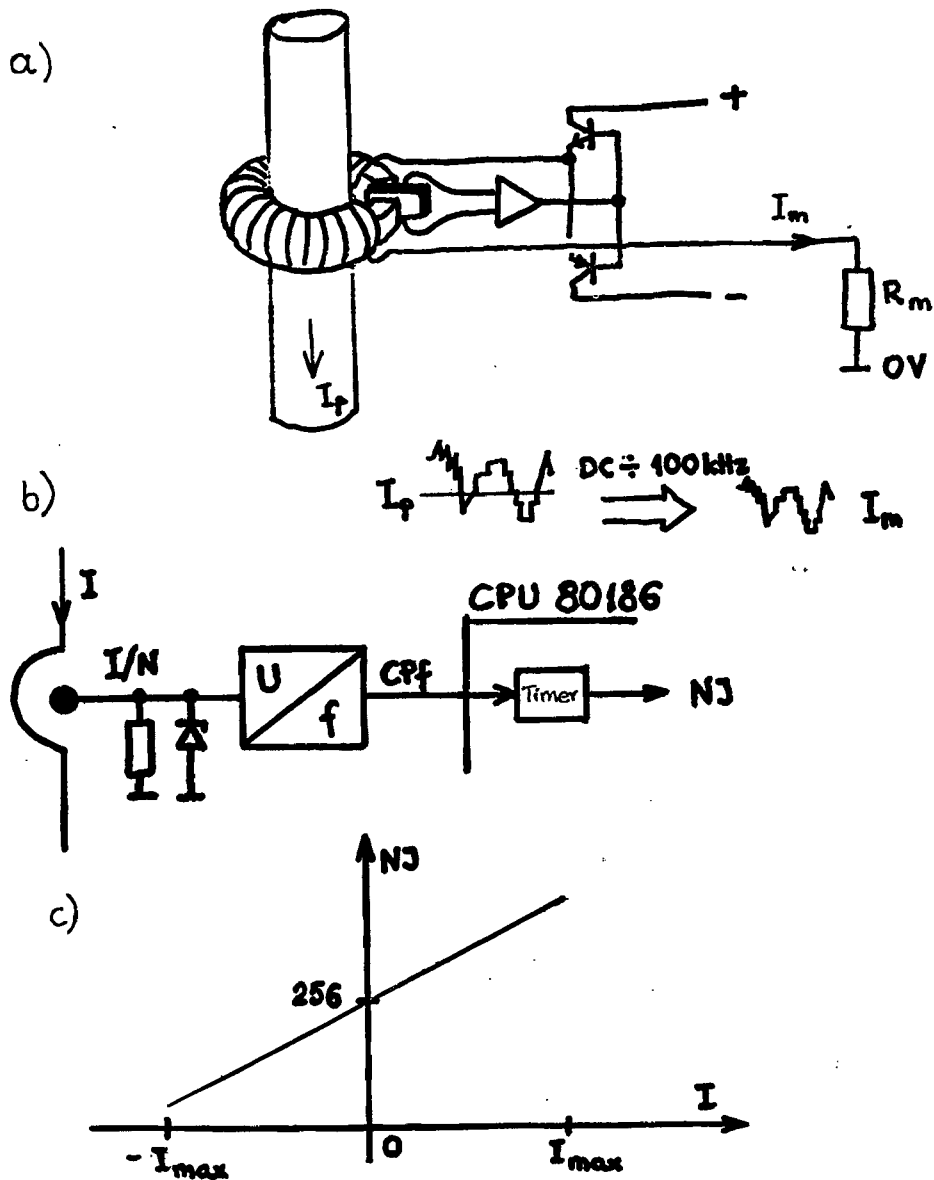
$$V_i = R_i - R_{i-1}$$

Minimalna wartość prędkości odczytywana w tych warunkach ($V = 1$) wynosząca 1 przyrost rezolwera w ciągu $T = 2$ ms odpowiada prędkości obrotowej wirnika $n = 7,3$ obr./min, co w zupełności wystarcza przy regulacji ruchu robotów przemysłowych.

Zastosowanie rezolwera jako miernika położenia i prędkości stwarza konieczność zainstalowania w układzie sterowania dodatkowego układu zasilającego. Rezolwer zasilany jest dwoma sygnałami SIN i COS wiernie odtwarzającymi te funkcje matematyczne. Układ ten znajduje się na oddzielnym pakiecie o symbolu MV21 umieszczonym w kasie AMS i obsługującym do 9 rezolwerów. Przyjmuje on także sygnały wyjściowe owoych rezolwerów określające położenie poszczególnych osi robota. W układzie zastosowano transformatorowe oddzielenie galwaniczne sygnałów zasilających rezolwery jak i z nich przychodzących, co zmniejszyło możliwość wejścia zakłóceń od strony rezolwerów.

3.3. Pomiar prądu

Sygnałem, wyjściowym z regulatora prędkości jest wartość zadana prądu NJ_{refi} . Porównywany jest on z prądem rzeczywistym NJ_i płynącym przez silnik. Różnica obu tych wielkości:



Rys. 4. Pomiar prądu w sterowniku cyfrowym; a) halotronowy przekładnik prądowy LA 25-NP; b) schemat blokowy układu pomiaru prądu; c) charakterystyka przetwornika prądu

$$e_i = NJ_{\text{refi}} - NJ_1$$

jest sygnałem wejściowym regulatora prądu.

Pomiar prądu płynącego przez silnik dokonywany jest po jego przetworzeniu w halotronowym przekładniku prądowym LA 25 — NP produkcji LEM SA (Szwajcaria), którego schemat funkcjonalny przedstawiony został na rys. 4a. Działanie przekładnika polega na tym, że pole magnetyczne wytwarzane przez prąd pierwotny I_p (prąd silnika) kompensowane jest przez pole magnetyczne wytwarzane przez przepływ prądu wtórnego I_m w uzwojeniu nawiniętym na rdzeń, przy czym

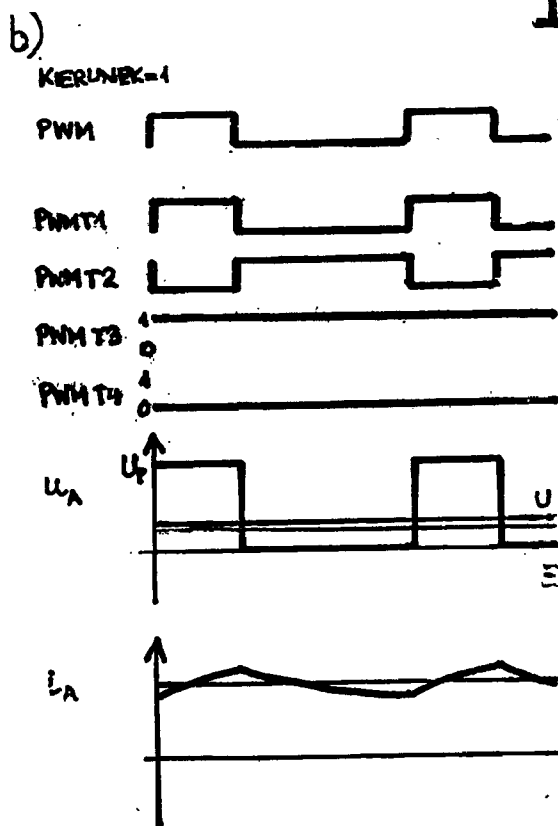
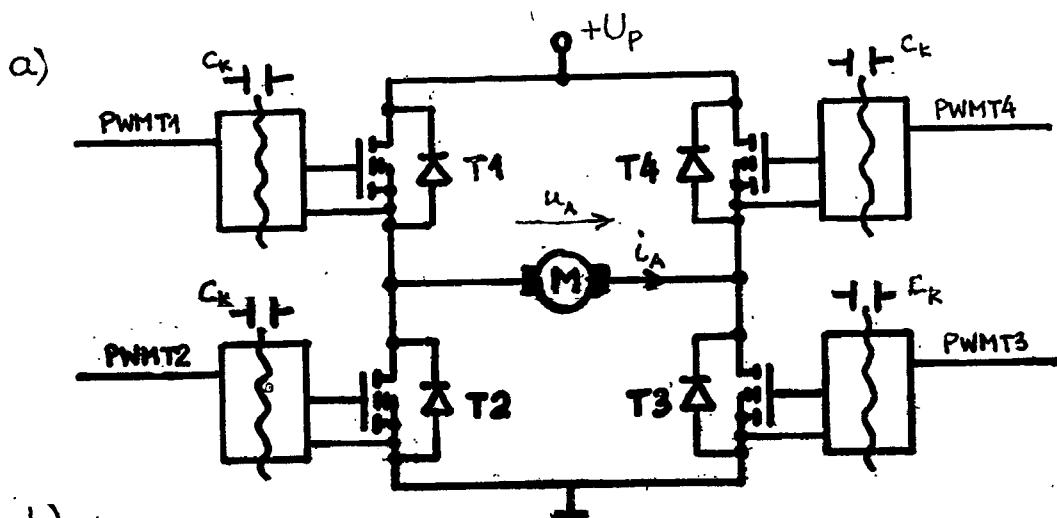
$$I_m + \frac{I_p}{N} \quad N \text{ — liczba uzwojeń wtórnych}$$

Układ posiada indukcyjny czujnik umieszczony w szczelinie rdzenia, który połączony jest z układem elektronicznym generującym prąd I_m . W układzie sterowania robotów zastosowano przekładnik o przełożeniu odpowiednio: dla IRp-6 — $N = 500$, dla IRp-60 — $N = 1000$. Prąd wtórny I_m może być mierzony na rezystorze pomiarowym R_m małej mocy.

Drugą bardzo istotną zaletą zastosowania układu LA 25-NP jest uzyskanie oddzielenia galwanicznego układu pomiarowego od obiektu, czyli uzwojenia silnika, a przez to zwiększenie odporności sterownika na zakłócenia wywoływane przełączaniem tranzystorów mocy i komutacją mechaniczną.

Pomiar prądu dokonywany jest przez pomiar napięcia na rezystorze pomiarowym. Napięcie to jest następnie przetworzone w przetworniku napięcie/częstotliwość na sygnał zegarowy CPF o częstotliwości proporcjonalnej do płynącego prądu (rys. 4b). Sygnał ten jest następnie zliczany w okresie $T = 256 \mu\text{s}$ w liczniku znajdującym się w mikroprocesorze 80C186. Wynik zliczania NJ odpowiada wartości prądu płynącego przez silnik. Rysunek 4c przedstawia charakterystykę przetwornika prądu. Układ pomiaru prądu znajduje się zgodnie z rys. 3 w zespole stopni końcowych mocy poza kasetą AMS, a sygnał zegarowy CPF przychodzący do sterownika cyfrowego przechodzi przez dodatkowy układ oddzielenia galwanicznego. Dwustopniowe oddzielenie galwaniczne zabezpiecza sterownik przed zakłóceniami.

W zespole stopni końcowych mocy znajduje się dodatkowy układ elektroniczny zabezpieczający tranzystory mocy przed spalaniem w przypadku wystąpienia zbyt dużego prądu wywołanego np. zwarcie na silniku.



Rys. 5. Stopień końcowy mocy sterownika cyfrowego. a) schemat funkcjonalny, b) sterowanie stopnia końcowego mocy

3.4. Stopień końcowy mocy

Stopień końcowy mocy cyfrowego sterownika stanowi układ mostkowy zbudowany na tranzystorach mocy MOSFET (rys. 5). Sterowany jest on sygnałem PWM, czyli sygnałem prostokątnym o zmiennym wypełnieniu. Okres sygnału PWM jest stały i wynosi w sterowniku 256 μ s. Generowany jest on w układzie zegarowym "Timer", znajdującym się w mikroprocesorze 80186 i napędzanym sygnałem zegarowym o częstotliwości 2 MHz. W czasie gdy stan sygnału PWM jest równy 1, na silnik podane jest, poprzez stopień końcowy mocy, napięcie z prostownika U_p , równe 48 V dla robota RP-6 i 120 V dla RP-60. W stanie 0 na wirnik silnika podane jest napięcie 0 V (zwarcie zacisków). Stąd wartość średnia napięcia podawana na uzwojenie wirnika silnika zależy od wypełnienia sygnału PWM. Stopień wypełnienia obliczany jest w regulatorze prądu jako wartość N_A i uaktualniany co 256 μ s, czyli w okresie pracy regulatora prądu.

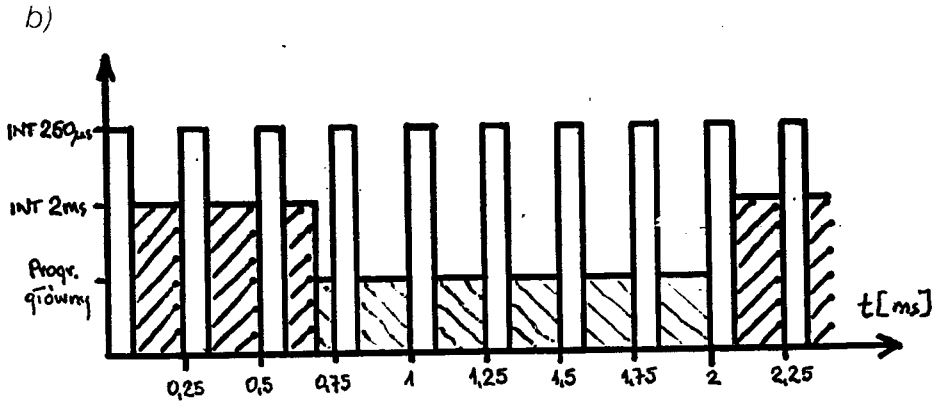
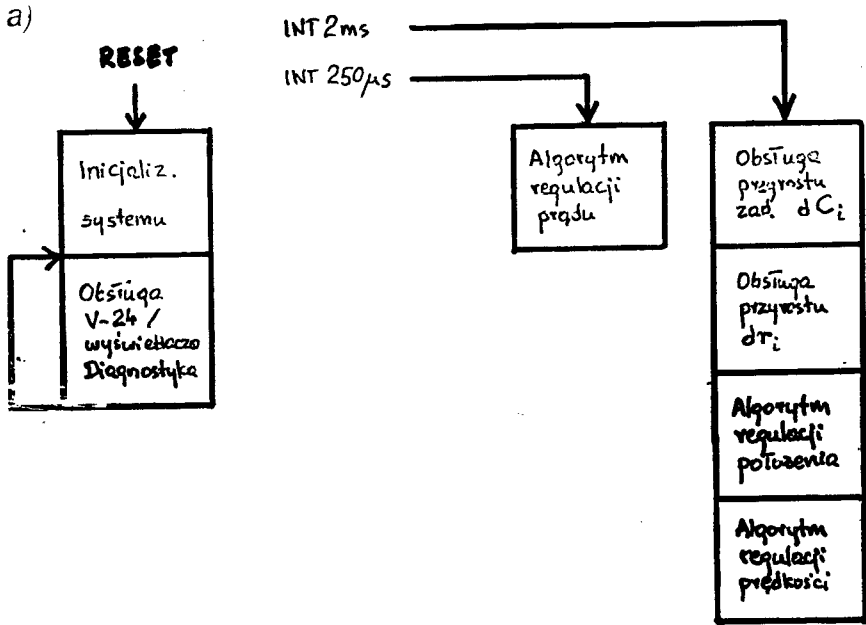
Kierunek wirowania silnika określony jest oddzielnym sygnałem KIERUNEK, którego stan ustalany jest w regulatorze prądu. Sygnały PWM i KIERUNEK, po przejściu przez układy optoizolacyjne w sterowniku cyfrowym, przesyłane są do zespołu stopni końcowych mocy. Na ich podstawie wytwarzane są w układzie cyfrowym sygnały sterujące poszczególnymi tranzystorami mocy PWM1-4. Każdy z układów sterujących tranzystorami posiada optoizolator oddzielający układ sterowania od stopnia końcowego mocy.

Zastosowanie w stopniu końcowym mocy tranzystorów mocy typu MOSFET zmniejsza zdecydowanie straty mocy w stosunku do tranzystorów biopolarnych, a co za tym idzie — o wiele zmniejsza wydzielanie się ciepła. Przebiegi niektórych sygnałów w stopniu końcowym mocy pokazane zostały na rys. 5.

3.5. Działanie regulatorów

Sterownik cyfrowy jest układem elastycznym, którego działanie określa program mogący być łatwo modyfikowany, bez konieczności zmian sprzętowych. Umożliwia on tworzenie różnych algorytmów regulacji, co nie było możliwe przy stosowaniu analogowych sterowników. Dla układu sterowania robotów stworzony został program realizujący kaskadową regulację składającą się z trzech pętli: regulatora położenia, prędkości i prądu (rys. 3).

Regulator położenia jest regulatorem proporcjonalnym o nieliniowej charakterystyce. Jest on przetwornikiem parabolicznym, którego wielkością wejściową jest błąd położenia d_p , a wyjściem prędkość zadana V_{refi} . Kształt paraboli można zmieniać wpisując do pamięci EEPROM odpowiednią wartość współczynnika. Cykl pracy regulatora wynosi 2 ms.



Rys. 6. Program sterownika cyfrowego. a) schemat blokowy programu, b) przebieg czasowy programu

Regulatory prędkości i prądu w analogowych sterownikach mocy stosowanych w układach sterowania robotów IRp są regulatorami typu PI. Regulator taki jest układem korekcyjnym proporcjonalno-całkującym, tzn. realizuje następującą zależność wielkości u (sygnał wyjściowy regulatora) od e (różnica sygnałów wielkości zadanej i rzeczywistej):

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right]$$

gdzie: K jest współczynnikiem wzmocnienia proporcjonalnego
 T_I jest stałą całkowania

Dla regulatora analogowego sygnały wejściowe i wyjściowe są wielkościami analogowymi. Zmienne wejściowe są podawane w sposób ciągły na wejście regulatora, a wyjściowe są stale do dyspozycji na jego wyjściu. Regulator reaguje od razu na zmianę wielkości wejściowej zgodnie ze swoim algorytmem regulacji. Opóźnienia występują tylko wtedy, gdy przewidziane są w algorytmie.

Obraz ten zmienia się znacznie, jeśli zamiast regulatora analogowego zastosujemy regulator cyfrowy, tzn. gdy algorytm regulacji realizowany jest np. przez mikrokomputer. Mikrokomputer musi przetwarzać sygnały wejściowe (przez wykonanie szeregu operacji) na odpowiednie sygnały wyjściowe, stąd wymagany jest określony czas obliczeń. Regulator cyfrowy reaguje więc na zmiany sygnału wejściowego z pewnym opóźnieniem. Jak długo wykonywany jest algorytm regulacji, tak długo regulator nie może odczytywać nowych informacji wejściowych. Oznacza to, że wielkości wejściowe wczytywane są przez mikrokomputer w określonych punktach czasowych, a sygnały wyjściowe regulatora $u(t)$, sterujące obiektem, uaktualniane są z tym samym okresem T .

Aby otrzymać cyfrowy odpowiednik analogowego regulatora PI opisanego powyższym równaniem, zamiast składnika z całką wstawiamy sumę $\sum_{k=1}^i e \cdot T$. Stąd:

$$u_i = K \left[e_i + \frac{T}{T_I} \sum_{k=1}^i e_k \right] \quad T \text{ — czas cyklu}$$

Postać ta jest niedogodna dla wykonywania obliczeń, gdyż aby skorzystać z tego wzoru, w każdym cyklu konieczna jest znajomość wszystkich poprzednich sygnałów uchybu e_k w celu ich zsumowania. Aby tego uniknąć wprowadza się inną postać algorytmu:

$$u_i - u_{i-1} = K \left[(e_i - e_{i-1}) + \frac{T}{T_I} \cdot e_i \right]$$

i stąd:

$$u_i = u_{i-1} + K \left[(e_i - e_{i-1}) + \frac{T}{T_I} \cdot e_i \right] = \sum_{k=-1}^i K \left[(e_k - e_{k-1}) + \frac{T}{T_I} \cdot e_k \right]$$

Dla obliczenia sygnału sterującego w aktualnym punkcie czasowym iT konieczna jest więc znajomość trzech wielkości: wartości sygnału sterującego w poprzednim cyklu (u_{k-1}) oraz aktualnej i poprzedniej wartości uchybu e_i, e_{i-1} .

Regulator prędkości typu PI pracuje w cyklu $T_c = 2,098$ ms. Wielkością wejściową jest różnica prędkości zadanej V_{refi} i prędkości rzeczywistej V_i :

$$E_i = V_{refi} - V_i$$

Wyjściem z tego regulatora jest prąd zadany NJ_{ri} dla regulatora prądu, którego wartość określa algorytm regulatora:

$$NJ_{ri} = \sum_{k=-1}^i K_p \left[(E_k - E_{k-1}) + \frac{T_c}{T_p} E_k \right]$$

Wzmocnienie K_p regulatora i stała całkowania T_p są jego parametrami, które przechowywane są w pamięci EEPROM. Ich wartość można zmieniać za pomocą panelu programowania. Prąd zadany NJ_r może być ograniczony do wartości NJ_{max} będącej również parametrem wpisywanym do pamięci EEPROM.

Regulator prądu jest również typu PI i pracuje w cyklu $T_s = 0,256$ ms. Wielkością wejściową jest różnica prądu zadanego NJ_{ri} i prądu rzeczywistego NJ_i :

$$e_i = NJ_{ri} - NJ_i$$

Wyjściem z tego regulatora jest współczynnik N_A określający wypełnienie sygnału PWM, a jego wartość określa algorytm:

$$N_{Ai} = \sum_{k=-1}^i K_{PI} \left\{ (e_k - e_{k-1}) + \frac{T_s}{T_{PI}} \cdot e_k \right\}$$

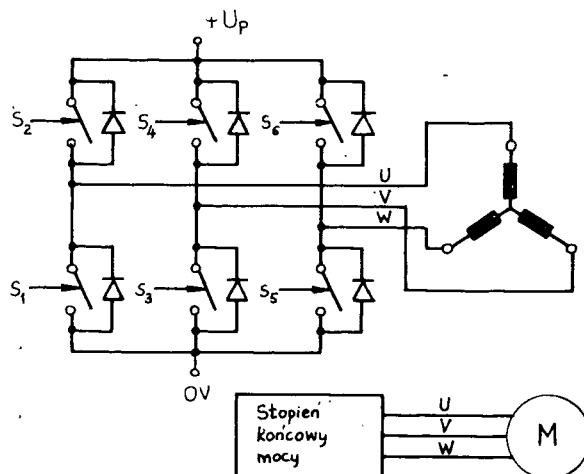
Parametry K_{PI} i T_{PI} regulatora przechowywane są w pamięci EEPROM.

Program sterownika cyfrowego pracuje wykorzystując dwa przerwania. Przerwanie o wyższym priorytecie wywołuje co 256 μ s podprogram realizujący algorytm regulacji prądu. Drugie przerwanie, wywoływane co 2,096 ms, wywołuje podprogram, który realizuje obsługę rozkazu dC_1 z nadrzędnej jednostki centralnej, odczyt położenia rezolwera i obliczenie przyrostu ruchu dr_1 oraz algorytmów położenia i prędkości. Schemat blokowy programu oraz jego przebieg czasowy przedstawiony został na rys. 6. W czasie gdy nie obsługiwane jest żadne z przerw, wykonywany jest program główny obsługujący m.in. interfejs szeregowy V-24 w celu ewentualnej zmiany parametrów regulacji.

4. TENDENCJE ROZWOJU UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

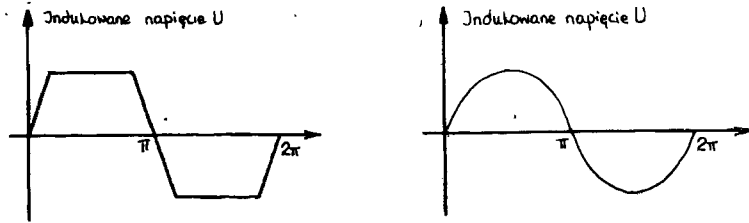
4.1. Silniki z komutacją elektroniczną

Przez długi czas silniki prądu stałego dominowały w serwonapędach. Napęd DC znajduje miejsce i dzisiaj w wielu zastosowaniach. Często wyrażany pogląd, że komutator



Rys. 7. Stopień końcowy mocy silnika z komutacją elektroniczną

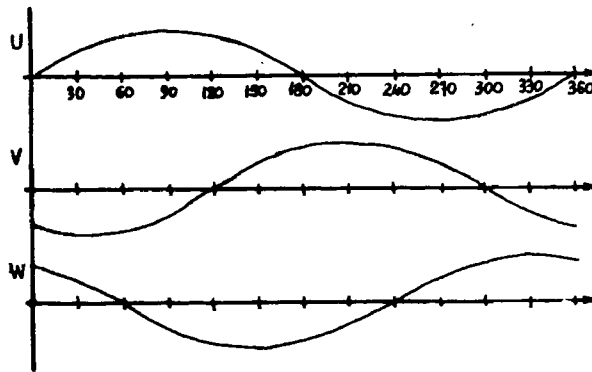
mechaniczny silników prądu stałego ulega szybkiemu zużyciu ma coraz mniejsze znaczenie, ze względu na stosowanie coraz lepszych materiałów. Przy normalnych, nie agresywnych warunkach otoczenia komutator mechaniczny można uznać za niezawodną część składową silnika. Jednakże statystyka wykazuje spadek zastosowań napędów DC, a nowe zastosowania realizowane są za pomocą coraz bardziej popularnych silników



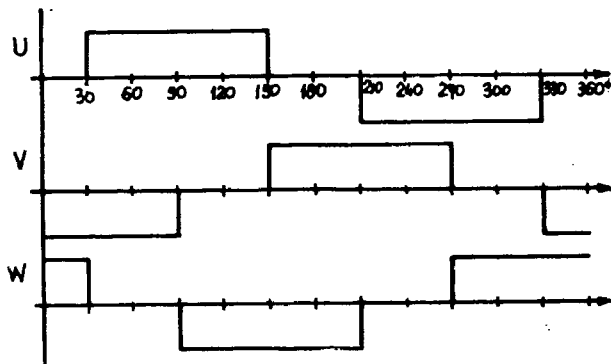
Silnik zasilany prostokątnie

Silnik zasilany sinusoidalnie

Rys. 8. Indukowane siły elektromotoryczne w silnikach z komutacją elektroniczną



Sterowanie prostokątne



Sterowanie sinusoidalne

Rys. 9. Rodzaje sterowania silników z komutacją elektroniczną

z komutacją elektroniczną. Widać ową tendencję także w nowych robotach przemysłowych.

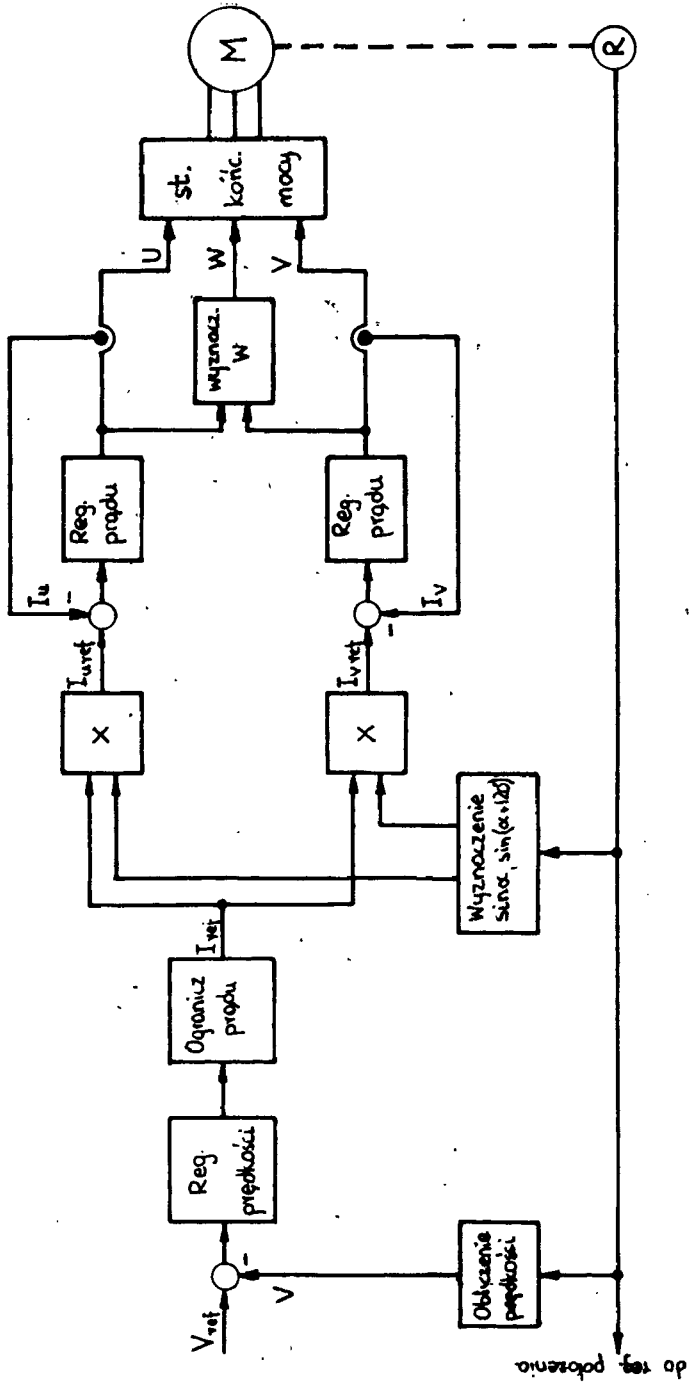
Budowa bezszczotkowego silnika różni się zasadniczo od budowy silników z komutacją mechaniczną. Większość silników z mechanicznym komutatorem posiada stojan składający się z magnesów trwałych oraz wirnik z uzwojeniem. Silniki z komutacją elektroniczną posiadają magnesy umieszczone na wirniku, natomiast na stojanie znajdują się 3 uzwojenia, przesunięte względem siebie o 120° . Stopień końcowy mogący sterować takim silnikiem przedstawiony został na rys. 7. Składa się on z 3 układów półmostkowych, przy czym każdy z tych układów posiada dwa tranzystory kluczujące, przedstawione na rysunku w postaci przełączników. Są one sterowane (otwierane lub zamykane) niezależne sygnałami sterującymi wytwarzanymi w układzie sterującym komutatora elektronicznego.

W serwonapędach z komutacją elektroniczną rozróżnia się dwa typy silników: silnik ze sterowaniem prostokątnym i silnik ze sterowaniem sinusoidalnym. Wykazują one różnice w budowie uzwojeń i rozkładzie pól magnetycznych. Pierwszy z wymienionych silników cechuje się tym, że podczas obrotu wirnika indukuje się w jego uzwojeniach siła elektromotoryczna w kształcie trapezu. W drugim przypadku napięcie indukowane ma kształt sinusoidy (rys. 8).

W silniku ze sterowaniem prostokątnym zasilane są w danym momencie jedynie dwa uzwojenia. Podczas obrotu wirnika następuje w określonym jego położeniu przełączanie tych zasilających, jak również zmiana kierunku płynięcia wymuszanego prądu przez dane uzwojenie, tak jak pokazuje to rys. 9a. Zadanie to realizuje elektroniczny komutator. Dla określenia punktu przełączania służą zwykle w tych silnikach zamontowane w nich halotronowe czujniki położenia wirnika. Muszą być one umieszczone w obudowie silnika z największą dokładnością, aby zmniejszyć skokowe zmiany wartości momentu napędowego w chwili przełączania. Ponieważ czułość przełączników halotronowych zależy od temperatury, więc punkt przełączania może przesuwać się w czasie, negatywnie wpływając na proces komutacji. Wytwarzany moment napędowy jest z tego powodu nie tylko zależny od wielkości prądu silnika, ale i od względnego położenia wirnika w stosunku do stojana. Te właściwości w wielu zastosowaniach silników są negatywne i wpłynęły na to, że przodujące firmy oferują wyłącznie silniki ze sterowaniem sinusoidalnym.

W silniku z ww. sterowaniem trzy uzwojenia zasilane są w sposób ciągły, przy czym wymuszanie prądu w poszczególnych trzech uzwojeniach powinno przebiegać zgodnie z rys. 9b. Przy sterowaniu tego typu nie występują skokowe zmiany prądu, a co za tym idzie — zmiany momentu napędowego. Realizacja techniczna jest w tym przypadku trudniejsza, co pociąga za sobą wzrost ceny sterownika.

Schemat blokowy przyjętego powszechnie sposobu sterowania przedstawiony został na rys. 10. Jako miernik położenia wirnika używany jest rezolwer, który dostarcza wszystkich informacji: dla regulatora położenia, prędkości jak i dla komutatora



Rys. 10. Schemat blokowy sterowania sinusoidalnego silnika z komutacją elektroniczną

elektronicznego. Sygnały U i V będące sygnałami o modulowanym wypełnieniu PWM są obliczane w oddzielnych regulatorach prądu I_u i I_v . Trzeci sygnał dla prądu I_w wynika z zależności:

$$W = -(U + V)$$

gdyż z praw Kirchhoffa spełniona powinna być zależność:

$$I_w = -(I_u + I_v)$$

Widać stąd, że konieczna jest realizacja algorytmów dwóch regulatorów prądu, jak i pomiar prądów I_u i I_v . Wartościami zadanymi dla tych regulatorów są wartości otrzymane przez pomnożenie prądu zadanego z regulatora prędkości odpowiednio przez $\sin\alpha$ $\sin(\alpha + 120^\circ)$

Zaletami serwonapędu z silnikiem sterowanym sinusoidalnie w stosunku do serwonapędu z silnikiem prądu stałego są:

- duże momenty obrotowe, także w stanie zatrzymanego silnika,
- uzyskanie większych obrotów, gdyż nie istnieje ograniczający wpływ komutatora mechanicznego,
- lepsza dynamika podczas przyspieszania i hamowania,
- uzyskanie większej mocy przy porównywalnych wymiarach, przez zastosowanie nowych materiałów na magnesy trwałe,
- lepsze odprowadzanie ciepła — obudową a nie poprzez wał silnika,
- czas pracy ograniczony jedynie trwałością łożysk tocznych,
- brak obsługi.

Wadą jest wyższa cena spowodowana skomplikowanym układem komutatora elektronicznego.

4.2. Autonomiczny układ napędowy

Do niedawna w technice napędów elektrycznych praktyką było rozdzielenie serwonapędu na dwie części. Z jednej strony znajdowała się część pozycjonująca z regulatorem położenia, z drugiej — regulator prędkości i prądu wraz ze stopniem końcowym mocy. Obie części stanowiły odrębne urządzenia. Regulator położenia wykonywany był często w technice cyfrowej, podczas gdy regulatory prędkości i prądu były układami analogowymi. Połączenie między oboma urządzeniami stanowił analogowy sygnał o zakresie ± 10 V. Wiele firm na świecie przełamało w ostatnich latach ten zwyczaj konstruując serwonapędy całkowicie w technice cyfrowej (bazując na mikroprocesorach)

i połączyło te dwa urządzenia w jedno. Konstrukcja tego typu powstała także w PIAP w formie sterownika cyfrowego.

Opracowany dla układu sterowania robotów przemysłowych sterownik cyfrowy przeznaczony jest do pracy w kasecie AMS. Musi on ponadto współpracować z innymi zespołami takimi jak zasilacz rezolwerów, stopień końcowy mocy lub też układ zasilający. Taka konstrukcja sterownika ogranicza jego zastosowanie do układów sterowania posiadających kasetę z magistralą wyżej wymienionego systemu.

W ostatnich latach pojawiły się na rynku sterowniki autonomiczne, nie związane z żadnym systemem. Przewodzą tu takie firmy jak Hauser, Control Techniques, Siemens, Indramat, Allen Bradley i AEG. Sterowniki tego typu mogą pracować samodzielnie, po uprzednim zaprogramowaniu poprzez panel programowania, przez komputer typu IBM/PC lub też mogą być sterowane sygnałem z urządzeń zewnętrznych (cyfrowym lub analogowym). Główne zastosowania takich sterowników to:

- mechanizmy posuwu obrabiarek,
- roboty przemysłowe,
- pozycjonowanie stołów obrotowych,
- elastyczne linie i moduły produkcyjne,
- urządzenia transportowe, takie jak przenośniki taśmowe,
- urządzenia załadownicze i rozładownicze oraz wszelkie urządzenia wymagające nadążnego precyzyjnego sterowania położeniem.

Opierając się na doświadczeniach wyniesionych przy konstruowaniu sterownika cyfrowego, PIAP zamierza opracować tego typu układ serwomechanizmu.

5. SPIS LITERATURY

- [1] Abel D.: Stand der elektrischen Servoantriebstechnik. Antriebstechnik 1990, Vol. 29, nr 4.
- [2] Lehmann R.: Entwicklungstendenzen der Servoantriebstechnik. Elektronik 1988, nr 8 i 9.
- [3] Lehmann R.: Technik bürstenloser Servoantriebe. Elektronik 1989, nr 21 i 22.
- [4] Stern M., Rauber K.: Digitaler Positionierregler für Linearachsen. Elektronik 1991, nr 3.