

Silniki elektryczne w praktyce elektronika, część 7

Układy stabilizacji obrotów i pozycjonowania

Regulacja a stabilizacja obrotów

Dotychczas zajmowaliśmy się głównie metodami regulacji obrotów różnego rodzaju silników, nie wnikając zbyt w temat stabilności obrotów przy zmianach np. obciążenia lub warunków zasilania. W wielu zastosowaniach (wentylatory, elektronarzędzia, sprzęt AGD) stałość obrotów nie jest szczególnie istotna, ale na przykład w napędzie HDD lub kamery wideo stabilne obroty są warunkiem poprawnego działania, a napęd windy musi zachować stałą prędkość przy bardzo dużych zmianach obciążenia.

Rys. 48 przedstawia schematy blokowe układów z otwartą pętlą (a) oraz z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego (b). Układ z otwartą pętlą cechuje prostota i niski koszt realizacji, ale nadaje się on tylko do wybranych zastosowań o niewygórowanych

Układy stabilizacji obrotów oraz precyzyjnego pozycjonowania

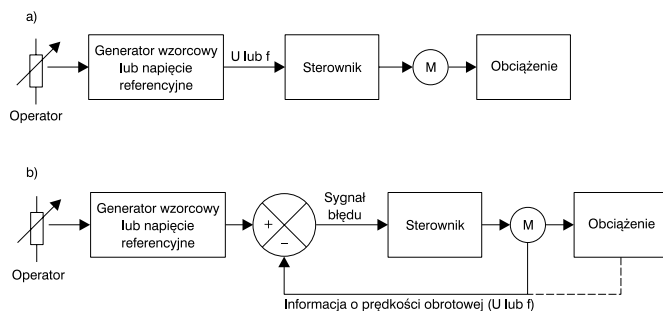
napędów elektrycznych stały się podstawą szybkiego rozwoju automatyki i robotyki. Nowoczesne układy napędowe to nie tylko roboty przemysłowe i marsjańskie pojazdy, ale także napędy dyskowe i CD/DVD, drukarki, magnetowidy, bankomaty, myjnie samochodowe, automaty do kawy i setki innych urządzeń powszechnego użytku.

parametrach. Silniki krokowe oraz synchroniczne silniki AC charakteryzują się dużą stałością obrotów (zależnych od częstotliwości). Jeżeli zastosujemy generator wzorcowy stabilizowany kwarcem, to stabilność obrotów może być bardzo dobra pod warunkiem, że obciążenie nie przekroczy dopuszczalnej granicy. Niestety taki układ nie jest w stanie prawidłowo zareagować na przeciążenia ani uwzględnić problemów wynikających przy rozpędzaniu i hamowaniu elementów o dużej bezwładności.

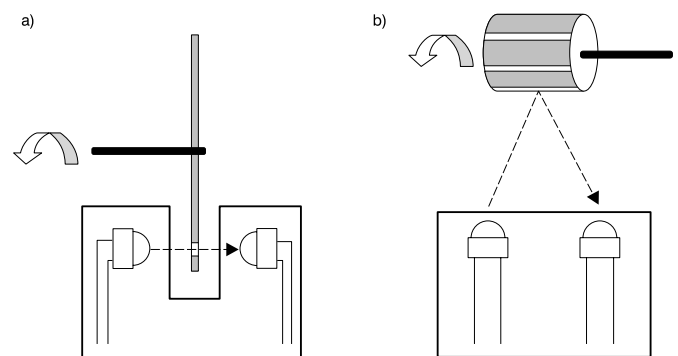
Dobrym przykładem jest tutaj winda, która musi łagodnie przyspieszać i hamować przy jeździe w dół i do góry, bez względu na to czy jest pusta, czy w pełni obciążona.

Powyższych wad jest pozbawiony układ z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. Wymaga on bardziej rozbudowanej elektroniki oraz zastosowania czujnika dostarczającego sygnału proporcjonalnego do prędkości obrotowej (napiecie lub często-

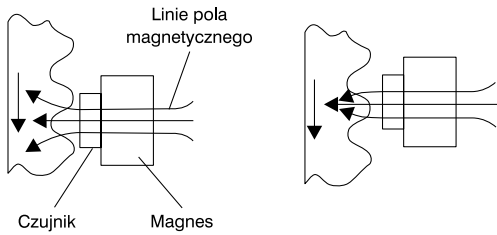
tliwość impulsów). Dostarczany do sterownika sygnał błędu wynika z porównania aktualnej prędkości obrotowej z wartością zadaną. Czujnik może mierzyć prędkość wału silnika, ale w przypadku stosowania przekładni lub sprzęgieł korzystnie jest mierzyć prędkość elementów napędzanych (linia przerywana na rys. 48b). Silniki bezszczotkowe BLDC (omówione w 2 części kursu) mają zwykle wbudowane czujniki położenia wirnika, ste-



Rys. 48



Rys. 49



Rys. 50

rownik takiego silnika z założenia realizuje funkcję stabilizacji obrotów z zamkniętą pętlą.

Czujniki obrotów

Najstarszym urządzeniem do pomiaru prędkości obrotowej jest prądnica tachometryczna, dostarczająca napięcie proporcjonalne do prędkości obrotowej. Ze względu na wysoki koszt i konieczność mechanicznego sprzężenia z układem napędzanym, ma znaczenie wyłącznie historyczne. Obecnie powszechnie stosowane są bezstykowe metody pomiaru prędkości obrotowej, na wyjściu czujnika otrzymuje się ciąg impulsów o częstotliwości proporcjonalnej do obrotów. Idealny czujnik powinien charakteryzować się dużą maksymalną szybkością pracy oraz odpornością na zakłócenia i warunki środowiska. Dokładność i szybkość pomiaru zależy od częstotliwości impulsów. Przykład: dla 100 obr/min i 1 impulsu/obrót, minimalny czas pomiaru wynosi 600 ms. Oznacza to, że dla uzyskania rozsądnych czasów reakcji i wysokiej dokładności stabilizatora obrotów należy zastosować przynajmniej kilka impulsów na obrót (przy bardzo małych prędkościach obrotowych nawet kilkadziesiąt impulsów/obrót). Nie jest to problemem przy prędkościach powyżej 1000 obr/min, wtedy czas reakcji stabilizatora jest pomijalny w porównaniu z mechaniczną bezwładnością napędu.

Czujniki optyczne – mają konstrukcję zbliżoną do transoptora i tak też są często nazywane w katalogach producentów. Występują w dwóch odmianach: transoptory szczelinowe i refleksyjne (rys. 49). Czujnik szczelinowy współpracuje z perforowaną tarczą, natomiast czujnik refleksyjny wymaga umieszczenia na wirującym elemencie pasków odbijających światło. Czas reakcji rzędu μs jest wystarczający nawet dla bardzo szybkich układów napędowych. Wadą czujników optycznych jest ich wrażliwość na kurz i wilgoć, poza tym silne oświetlenie zewnętrzne może powodować błędy. W celu uniknięcia tych problemów czujniki powinny być odpowiednio obudowane. Duży wybór transoptorów szczelinowych i refleksyjnych oferują m.in. firmy OPTEK

(seria OPB...), VISHAY (TCRT..., TCST...), LITEON (LTH...), czujniki do celów przemysłowych: OMRON, HONEYWELL.

Czujniki magnetyczne Halla – były już omawiane w 2 części artykułu. O ile ich zastosowanie do pomiaru prędkości namagnesowanego wirnika nie jest problemem, to w każdym innym przypadku element wirujący musi mieć przymocowane magnesy. Czas reakcji czujników Halla jest porównywalny z optycznymi. Nie są wrażliwe na kurz, ale za to ich pracę mogą zakłócać zewnętrzne pola magnetyczne.

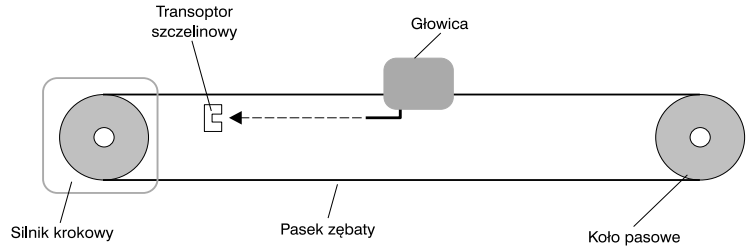
Czujniki magnetorezystywne – mają działanie zbliżone do czujników Halla, ale funkcjonują na innej zasadzie. Zaletą tych czujników jest możliwość zamontowania tylko jednego magnesu – pod czujnikiem (rys. 50). W takim przypadku czujnik wykrywa zbliżenie elementu o właściwościach ferromagnetycznych. Producentem opisanych czujników jest Philips (KMZ10 i KMI15). Maksymalna częstotliwość pracy: 25 kHz.

Powyżej opisano tylko najbardziej typowe czujniki, w praktycznych układach spotyka się najróżniejsze rozwiązania, dopasowane do konkretnej aplikacji. Oto kilka przykładów:

Wykorzystanie SEM. Silniki komutatorowe DC z magnesem trwałym charakteryzują się obecnością siły elektromotorycznej. Napięcie SEM jest wprost proporcjonalne do prędkości obrotowej i może być wykorzystane do stabilizacji obrotów. Przykładowo produkowany kiedyś w Polsce układ UL1901N był powszechnie stosowany jako stabilizator obrotów w magnetofonach kasetowych z lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku.

Napędy dysków. W tym przypadku niezbędna jest bardzo dobra stabilność obrotów oraz synchronizacja fazowa. Do zgrubej stabilizacji służy czujnik optyczny, natomiast do precyzyjnej synchronizacji napędu wykorzystuje się odczytywane przez głowicę sygnały danych (np. znaczniki sektorów).

Napęd magnetowidów i kamer. W systemie VHS ścieżki obrazu zapisane są na taśmie ukośnie – każda ścieżka to je-



Rys. 51

den półobraz. Problem polega na synchronizacji pracy silnika przesuwu taśmy i silnika napędu dysku z głowicami w taki sposób, aby głowica zawsze trafiła na środek ścieżki wizyjnej. Układ śledzenia (*tracking system*) wykorzystuje do tego impulsy synchronizacji ramki, zapisane wzdłuż taśmy i odczytywane przez nieruchomą głowicę (razem z sygnałem fonii). Obroty silnika przesuwu taśmy są stabilizowane tak, aby częstotliwość ramki wynosiła dokładnie 50 Hz. Układ stabilizacji obrotów dysku z głowicami zapewnia synchronizację fazową obrotów dysku z impulsami ramki.

Wykorzystanie mikroprocesora do stabilizacji obrotów

Od strony sprzętowej układ stabilizatora obrotów niewiele różni się od opisanych wcześniej układów sterujących. W przypadku silników krokowych i synchronicznych AC, układ z otwartą pętlą sprzężenia ma stabilność obrotów zależną od częstotliwości zegarowej procesora – oczywiście pod warunkiem, że generowanie impulsów sterujących uzwojeniami nie zostanie zakłócone przez obsługę innych procesów (przerwań). W układzie z zamkniętą pętlą jest potrzebne tylko jedno dodatkowe wejście procesora dla czujnika prędkości. Funkcje pomiaru czasu pomiędzy impulsami z czujnika oraz sterowania obrotami są realizowane programowo. Przy odrobnie dobrych chęci można znaleźć w Internecie gotowe biblioteki procedur realizujących funkcje cyfrowych pętli regulacji proporcjonalnej. Dodatkowo warto umieścić w programie procedury obsługi sytuacji awaryjnych (np. przeciążenie lub zablokowanie napędu) oraz w razie potrzeby – procedury płynnego rozruchu i hamowania.

Układy pozycjonowania

Trudno jest podać krótką i jednoznaczną definicję układów pozycjonujących. O ile w przypadku stabilizacji obrotów zakładaliśmy jednostajny ruch napędzanego elementu, to w przypadku pozycjonowania mamy do czynienia ze skokowym ruchem obiektu (obrotowym lub linio-

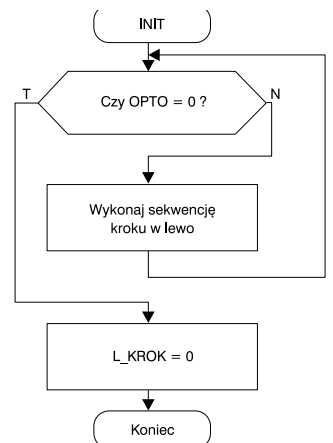
wym) pomiędzy określoną ilością stabilnych pozycji. Nie jest tu istotne, czy obiekt zatrzyma się na pozycji, ważna jest informacja, że np. w chwili t_1 znajduje się on w pozycji x_1 .

Układy pozycjonowania mają schematy blokowe zbliżone do stabilizatorów obrotów (rys. 48) z tym, że zamiast informacji o obrotach mamy informację o pozycji. Podział na układy z otwartą i zamkniętą pętlą sprzężenia nadal obowiązuje, lecz jego interpretacja jest nieco inna.

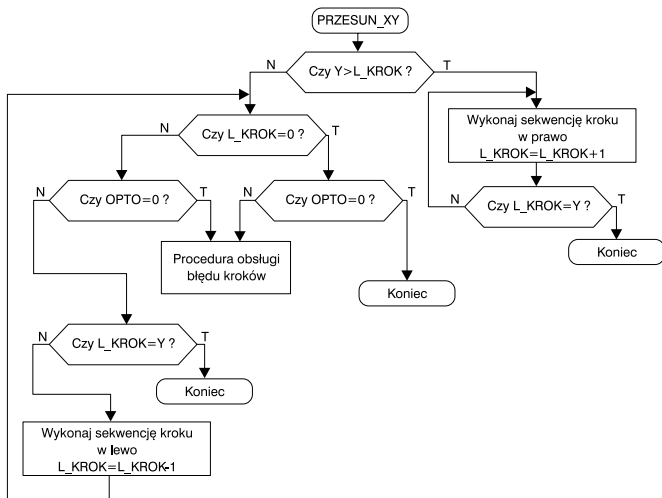
Układy pozycjonowania z otwartą pętlą.

Realizacja takich układów jest możliwa przy użyciu silników krokowych (ewentualnie BLDC), które umożliwiają skokowy obrót wirnika o precyzyjnie określony kąt. Warunkiem poprawnej pracy takiego układu jest poprawne zainicjowanie jego pracy – np. po włączeniu zasilania. Do tego potrzebny jest czujnik pozycji zerowej i odpowiednia procedura startowa napędu.

Sposób pracy takiego układu najlepiej omówić na konkretnym przykładzie. Na rys. 51 przedstawiono uproszczony schemat przesuwu głowicy drukarki igłowej. Do sterowania potrzebna jest zmienna całkowita: licznik kroków L_KROK oraz bitowa informacja o stanie transoptora (przesłonięty: OPTO = 0). Po włączeniu zasilania sterownik „nie wie”, w jakim położeniu znajduje się głowica i wykonuje procedurę INIT (rys.52). Po wykonaniu tej procedury głowica



Rys. 52

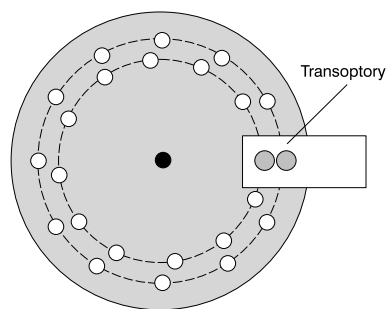


Rys. 53

znajduje się w pozycji spoczynkowej (*Home Position*) i napęd jest gotów do pracy. Program sterujący musi działać tak, aby w każdej chwili wartość licznika kroków odpowiadała aktualnej pozycji głowicy. Przykładowa procedura przesunięcia głowicy z pozycji X do Y jest przedstawiona na rys. 53. Parametrem wejściowym jest pozycja docelowa Y ($Y \geq 0$), początkowy stan licznika kroków $L_KROK = X$. Sekwencja przesunięcia w lewo jest rozbudowana o kontrolę poprawności pracy napędu. Przy normalnej pracy każdy powrót napędu do pozycji spoczynkowej ($L_KROK = 0$) powoduje pojawienie się sygnału z transoptora. Brak sygnału, gdy $L_KROK = 0$ lub jego wystąpienie, gdy $L_KROK < > 0$ oznacza, że podczas pracy wystąpiło „zgubienie” kroku. Może to się zdarzyć, np. w wyniku kolizji z przeszkodą, zablokowania napędu lub ingerencji człowieka. Niestety układ z otwartą pętlą sprzężenia jest w stanie wykryć fakt zgubienia kroku tylko w momencie powrotu do pozycji spoczynkowej. Jeżeli taki powrót nie wystąpi,

to napęd będzie nadal pracował przyjmując nieprawidłowe pozycje. Dlatego też układ z otwartą pętlą nie nadaje się do napędów o dużej precyzji i niezawodności działania. Zaletą takiego układu jest prostota sterownika i oprogramowania. W praktycznej realizacji programu trzeba jeszcze uwzględnić bezwładność napędu i odpowiednio sterować prędkością silnika – będzie o tym mowa w dalszej części artykułu.

Jako czujniki pozycji zerowej wykorzystuje się najczęściej transoptory szczelinowe. Zapewniają one precyzję pozycji zerowej rzędu 0,2 mm. Można też stosować



Rys. 54

czujniki magnetyczne, indukcyjne, pojemnościowe, lecz dokładność i szybkość działania będzie niższa. W najprostszym przypadku jako czujnik zerowy może służyć zwykły styk mechaniczny ze sprężystych blaszek. Takie rozwiązanie było z powodzeniem stosowane w prostych drukarkach paragonowych (Epson, Citizen).

Układy pozycjonowania z zamkniętą pętlą

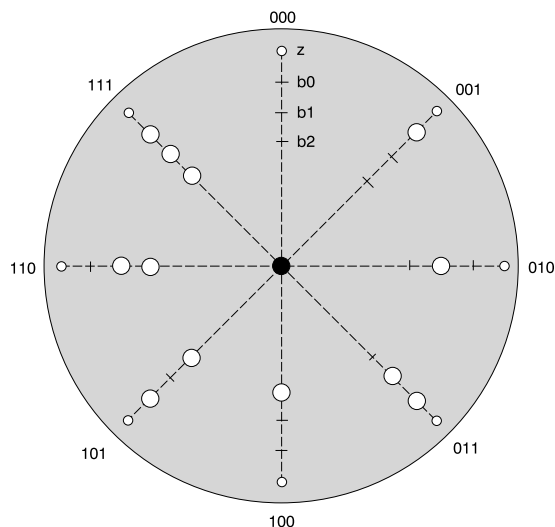
W takim układzie sterownik otrzymuje ciągłą informację o pozycji elementu napędzanego.

Spróbujmy do układu z rys. 51 dodać tarczę z 12 otworkami na obwodzie i transoptor szczelinowy, zamontowane na kole pasowym. Wtedy każdy obrót koła o kąt 30° spowoduje wygenerowanie jednego impulsu. W ten sposób można poinformować sterownik, że przesunięcie głowicy rzeczywiście nastąpiło, tylko jeszcze nie wiadomo, w którą stronę. Ten problem rozwiąże drugi rząd otworków, przesunięty względem pierwszego i drugi transoptor (rys. 54). Obracanie tarczą spowoduje po-

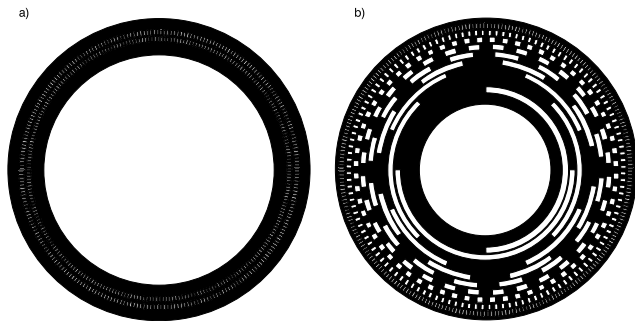
wstanie na wyjściach transoptorów dwóch ciągów impulsów prostokątnych o przesunięciu fazowym zależnym od kierunku obrotów. Nie jest to pełna informacja o bieżącej pozycji głowicy, ale raczej o zmianie tej pozycji. Czujnik pozycji zerowej jest nadal konieczny dla zainicjowania napędu, każde zgubienie kroku będzie jednak natychmiast zauważone przez sterownik. Taki rodzaj tarczy kodowej nazywany jest enkoderem inkrementalnym.

Enkoder absolutny

Inny rodzaj pozycjonowania i inny przykład: obrotnica kamery, która może ustawiać się w jednej z ośmiu pozycji kątowych co 45° . Można tutaj zastosować tarczę kodową z rys. 55 i poczwórny transoptor szczelinowy – jest to enkoder absolutny. Zewnętrzny pierścień otworów (z) daje sygnał „jest pozycja”, a pozostałe trzy ($b2...b0$) określają numer pozycji od 0 do 7 w kodzie binarnym. Zainicjowanie takiego napędu po włączeniu zasilania jest znacznie prostsze – wystarczy obracać



Rys. 55



Rys. 56

kamerą w dowolnym kierunku, aż do pojawienia się impulsu z transoptora (z), a następnie odczytać numer pozycji (b2...b0). Przy zmianie pozycji nie ma potrzeby liczenia kroków, a więc do napędzania obrotnicy można zastosować dowolny rodzaj silni-

ka (komutatorowy, BLDC, indukcyjny) i po prostu zatrzymać go w momencie osiągnięcia żądanej pozycji. Aktualna pozycja zajmowana przez kamerę jest monitorowana na bieżąco, można napisać program sterujący w taki sposób, aby każde wytrącenie kamery z zajmowanej pozycji przez działanie siły zewnętrznej było natychmiast korygowane.

Realizacje praktyczne enkoderów

Enkodery w formie perforowanego krążka z metalu lub tworzywa, wykonywane są dla rozdzielczości do kilkudziesięciu impulsów (kodów) na obrót. Enkodery do profesjonalnych

zastosowań przemysłowych mogą mieć rozdzielczości do kilku tysięcy pozycji, ich tarcze kodowe mają postać przezroczystego krążka z czarnymi polami naniesionymi metodą fotochemiczną.

Na **rysunku 56** przedstawiono tarcze kodowe precyzyjnych enkoderów. Enkoder inkrementalny z rys. 56a ma 256 impulsów/obrot, poza dwoma kanałami A i B posiada trzeci transoptor do znacznika pozycji zerowej Z (A, B, Z to typowe oznaczenia wyjść dekoderek inkrementalnych). Przesunięcie fazowe między A i B zwykle wynosi 1/4 T, tzn. połowę szerokości impulsu. Enkoder absolutny z rys. 56b jest 10-bitowy (1024 impulsy/obrot). Przemysłowe enkodery są montowane w szczelnych obudowach, mają łożyskową oś i układ wstępnej obróbki sygnału (wyjścia *open collector* lub cyfrowe TTL/CMOS). **Rys. 57** przedstawia enkoder OMRON serii E6B2-CWZ6C o rozdzielczości 100 do 1000 impulsów/obrot w zależności od wersji.

Zasady stosowania enkoderów

Pomimo pozornej prostoty, konstruktor precyzyjnego napędu z enkoderami może się natknąć

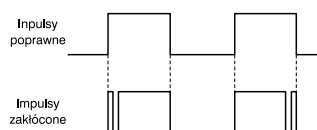
na kilka problemów. Szczególnie dotyczy to silników krokowych, ze względu na nieciągły charakter ruchu oraz drgania kątowe wirnika w końcowej fazie kroku.

Zakłócenia zbczy impulsów: wibracje napędu przenoszone na oś enkodera mogą zakłócać impulsy na wyjściu enkodera inkrementalnego (**rys. 57**). Zakłócenia mogą być fałszywie interpretowane przez oprogramowanie jako dodatkowe impulsy. Przeciwdziałaniem jest sprzętowa lub programowa filtracja sygnałów z enkodera, sprzęgło elastyczne tłumiące wibracje na wałku enkodera.

Gubienie impulsów przy zmianie kierunku. Zjawisko najlepiej widoczne w przypadku, gdy enkoder inkrementalny daje więcej niż jeden impuls na każdy krok silnika. Na przykład przy 2 impulsach/krok może się okazać, że wykonanie sekwencji [1 krok w prawo, stop, 1 krok w lewo, stop] dało 4 impulsy na wyjściu A i tylko 3 impulsy na wyjściu B. Mechanizm tego zjawiska ilustruje **rys. 58**. Nie jest to duży problem, pod warunkiem, że programista sterownika przewidział taką sytuację. Cza-



Rys. 57



Rys. 58

sami wystarczy obrócić enkoder względem napędu o niewielki kąt (mniej niż $1/4$ rozdzielczości kątowej), żeby zatrzymanie następowało zawsze przy stanie 00 na wyjściach enkodera. Przy rozdzielczości 1000 impulsów na obrót oznacza to konieczność montażu enkodera z dokładnością lepszą niż $360/4000 = 0,09$ stopnia.

Fałszywe kody w enkoderze absolutnym. Jak widać na rys. 56b, w enkoderach o dużej rozdzielczości kolejne pozycje następują bezpośrednio po sobie. Zwykle zmiana stanu na poszczególnych bitach nie następuje idealnie w tym samym momencie, co powoduje chwilowe pojawianie się fałszywych kodów na wyjściu enkodera. Szczególnie krytyczne są sytuacje, gdy zmieniają się wszystkie bity – np. zmiana z kodu 01111111 na 10000000. Dlatego też często w enkoderach absolutnych

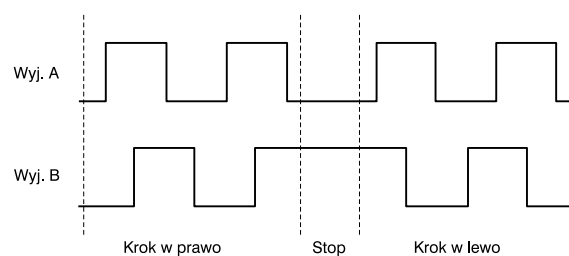
zamiast naturalnego kodu binarnego stosuje się kod, w którym sąsiednie słowa kodowe różnią się tylko jednym bitem (kod Gray'a).

Z powyższych informacji wynika ważny wniosek: nie warto stosować enkoderów o rozdzielczości wyższej niż rozdzielczość kroku silnika. Na pewno nie poprawi to jakości napędu a wręcz przeciwnie – wymaga od konstruktora znacznie więcej nakładu pracy dla uzyskania tego samego efektu i niepotrzebnie podnosi koszt urządzenia.

Inne czujniki pozycji

Istnieje jeszcze wiele innych metod przetwarzania położenia na sygnał elektryczny, np. rezolwery, transformatory LVDT, ale dają one sygnał analogowy i nie są chętnie stosowane w układach cyfrowego pozycjonowania (także ze względu na wysokie koszty).

Ostatnio dużą popularność zyskują czujniki magnetyczne. Działają one na zasadzie zbliżonej do kart telefonicznych: ścieżka magnetyczna ze znacznikami pozycji jest odczytywana przez głowicę. W zależności od potrzeb mogą one mieć for-



Rys. 59

mę krążka lub taśmy. Czujnik w formie „linijki” magnetycznej może zapewnić dokładność pozycjonowania rzędu dziesiątych części milimetra na drodze długości nawet kilku metrów.

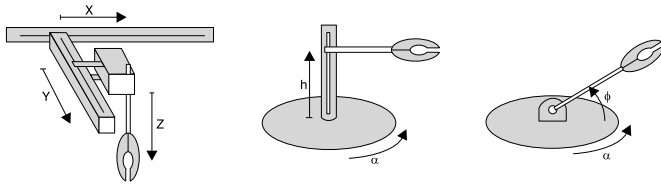
Trudno byłoby nie wspomnieć o przetwornikach potencjometrycznych – najstarszych czujnikach pozycji. Ostatnio przetworniki te wracają do łask ze względu na postęp technologiczny w produkcji ścieżek rezystywnych o bardzo dobrych parametrach elektrycznych i dużej odporności na ścieranie. Za rozsądną cenę można kupić przetwornik liniowy lub obrotowy o liniowości 0,1%, dobrej stabilności termicznej i trwałości do miliona cykli. Przetwornik potencjometryczny daje na wyj-

ściu napięcie stałe, proporcjonalne do kąta obrotu lub przesunięcia liniowego.

Pozycjonowanie przestrzenne

Istnieje wiele aplikacji, w których jeden procesor steruje kilkoma napędami, zapewniając pozycjonowanie w przestrzeni (plotery, obrabiarki numeryczne, roboty przemysłowe). Stosuje się trzy podstawowe systemy pozycjonowania przestrzennego (rys. 60):

Układ prostokątny XYZ – wymaga zastosowania trzech silników z przekładniami liniowymi, przestrzeń robocza ma kształt prostopadłościanu ograniczonego maksymalnymi wielkościami przesunięć w osiach X, Y i Z.



Rys. 60

Układ walcowy – składa się z napędu liniowego i obrotowego. Współrzędnymi roboczymi są: kąt obrotu α i wysokość h . Przestrzeń robocza ma kształt powierzchni walca.

Układ biegunowy – składa się z dwóch napędów obrotowych. Współrzędnymi roboczymi są: kąt obrotu α i kąt elewacji Φ . Przestrzeń robocza ma kształt powierzchni kuli.

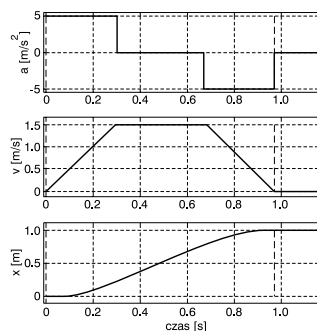
Układ XYZ jest najbardziej skomplikowany – zarówno pod względem mechanicznym, jak i oprogramowania. Stosuje się go tylko tam, gdzie jest to niezbędne (plotery, wiertarki koordynacyjne). Zaletą układu XYZ jest bezpośredni dostęp do każdego punktu przestrzeni roboczej. Znacznie łatwiejsze do wykonania są pozostałe typy napędów – wymagają tylko dwóch silników, a program operuje na dwóch zmiennych położenia. Napędy takie są często stosowane w robotyce i automatyce przemysłowej. W porównaniu z układem XYZ, układy walcowy i biegunowy mają ograniczony dostęp do przestrzeni roboczej, ale w niektórych zastosowaniach jest to zaletą – zmniejsza możliwość kolizji w przypadku pracy kilku napędów w tym samym obszarze. W praktycznych układach często stosuje się kombinacje trzech lub więcej napędów. Model manipulatora robota (rys. 61) zrealizowany w Technische Universiteit Eindhoven ma napęd liniowy i obrotowy podstawy oraz trzy napędy kąta elewacji. Taka liczba stopni swobody umożliwia wykonywanie nawet bardzo skomplikowanych czynności.



Rys. 61

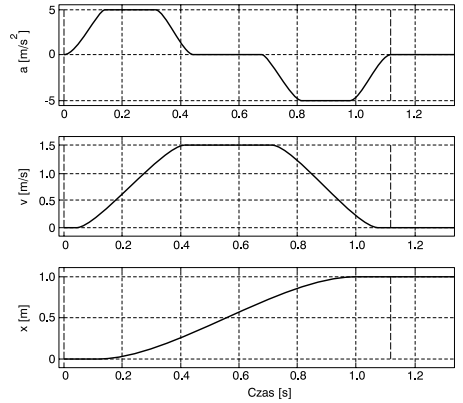
Trajektorie ruchu

W układzie pozycjonowania nie można pominąć wpływu momentu bezwładności obciążenia – każda zmiana pozycji musi zawierać przynajmniej dwie fazy ruchu: rozpędzanie i hamowanie. Nie zapewni tego prosty algorytm z rys. 53. W najbardziej skomplikowanym przypadku program sterujący musi na podstawie żądanej odległości przemieszczenia x określić odpowiednie przyspieszenie i prędkość. Charakterystyki przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia obiektu w funkcji czasu nazywamy trajektorią ruchu. Optymalna trajektoria jest zwykle kompromisem między bardzo wieloma parametrami, wymienię tylko kilka podstawowych: szybkość osiągnięcia pozycji docelowej, precyzja punktu zatrzymania obiektu, moment obrotowy silnika, dopuszczalne przyspieszenia, dopuszczalne obciążenia układu przeniesienia napędu. Poza tym funkcja opisująca trajektorię musi dawać rozwiązania zbieżne dla wszystkich możliwych wartości zmiennych wejściowych. Mniej obeznanym z matematyką należy się wyjaśnienie: chodzi o to, aby dla żadnej kombinacji parametrów (zmian obciążenia, docelowych itp.) nie mogła zdarzyć się sytuacja, że napęd zacznie oscylować wokół zadanej pozycji lub nie będzie potrafił jej osiągnąć. Najczęściej stosowane są trajektorie trapezowe (rys. 62) lub trajektorie „S” (rys. 63). Nazwy trajektorii wywodzą się od kształtu charakterystyki prędkości w funkcji czasu. Dla łatwiejszego porównania przedstawione trajektorie mają takie same wartości przemieszczenia $x=1$ m, maksymalnej



Rys. 62

prędkości $v=1,5$ m/s oraz przyspieszenia $a=5$ m/s². Obie trajektorie składają się z trzech faz ruchu: przyspieszanie, ruch ze stałą prędkością, hamowanie. W trajektorii trapezowej wartość przyspieszenia jest stała w fazie przyspieszania i hamowania, prędkość rośnie/maleje liniowo. W trajektorii „S” przyspieszenie łagodnie wzrasta



Rys. 63

krótszy czas przemieszczenia i jest łatwiejsza w realizacji, jednak do bardzo precyzyjnego pozycjonowania obiektów o dużej masie bezwładności korzystniejsza jest trajektoria „S”.

Powyższe informacje nie oznaczają, że algorytm z rys. 53 jest całkowicie nieprzydatny. Jeżeli napędzany obiekt ma małą bezwładność, a silnik dysponuje wystarczającą rezerwą mocy, to trajektoria z rys. 62 może przyjąć kształt prostokąta (właściwie „prawie prostokąta”, bo niemożliwa jest zmiana prędkości obiektu materialnego w czasie równym zero). Największym problemem może być uzyskanie odpowiednio dużego momentu hamującego, ale przy zastosowaniu przekładni redukcyjnej jest to możliwe.

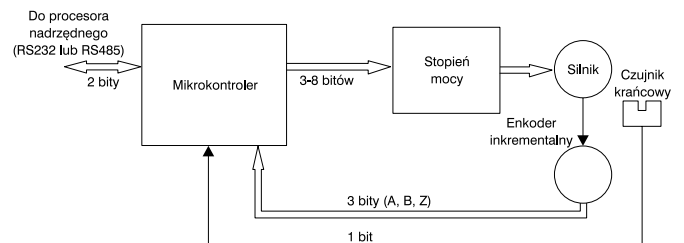
Realizacje praktyczne

Najprostszy układ pozycjonujący z zamkniętą pętlą nie jest zbyt skomplikowany od strony układowej (rys. 64). Ilość pinów we/wy procesora nie przekracza 15, czyli można tu zastosować proste mikrokontrolery np. 89C4051, AT90xxxx, PIC16xxxx. Gorzej wygląda sprawa oprogramowania. Procesor musi realizować w czasie rzeczywistym następujące minimum czynności: komunikacja z procesorem nadrzędnym (odbieranie poleceń, wysyłanie raportów), obróbka i interpretacja impulsów z enkodera i czujnika krańcowego, generowanie sekwencji sterujących

uzwojeniami silnika (sekwencje dla silnika krokowego lub ciąg impulsów PWM). Jest to zadanie dla ambitnego programisty, ale na pewno wykonalne dla niezbyt wysokich rozdzielczości enkodera i szybkości pracy napędu. Bardzo szybkie i precyzyjne układy pozycjonowania wymagają zastosowania procesorów DSP oraz rozbudowanego oprogramowania. Wiele firm (Matsushita, Omron, GE-Fanuc i inne) oferuje uniwersalne systemy, składające się z różnych modułów sprzętowych i oprogramowania konfiguracyjnego. Systemy te umożliwiają budowę kompletnych układów sterowania, dostosowanych do potrzeb określonej aplikacji. W przypadku napędów przemysłowych z silnikami indukcyjnymi lub synchronicznymi AC, układ pozycjonowania może być zintegrowany z falownikiem.

Ostatnio można zaobserwować szybki rozwój procesorów dedykowanych do sterowania napędami elektrycznymi. Obecnie takie układy oferuje Microchip (serie PIC18, DSPIC), Motorola (serie M68HC908MR, MC56F83). Niedługo może się okazać, że zbudowanie bardzo zaawansowanego sterownika silnika będzie wymagało jedynie zastosowania odpowiedniego układu scalonego z „wbudowaną inteligencją” (podobnie stało się na przykład z USB i TCP/IP – do zbudowania interfejsu nie jest konieczna szczegółowa znajomość protokołu). Era robotów z klocków LEGO już się rozpoczęła.

Jacek Przepiórkowski



Rys. 64