

Moduł 2

Budowa i zasada działania manipulatorów i robotów

1. Obszary działania manipulatorów
2. Budowa manipulatorów
3. Napędy osi manipulatorów
4. Roboty przemysłowe

1. Obszary działania manipulatorów

Wraz ze wzrostem rozwoju przemysłu i wykonywaniem coraz bardziej złożonych i precyzyjnych urządzeń pojawiły się problemy technologiczne, których najsłabszym ogniwem był człowiek i jego niedokładność w wykonywaniu prac, związana z wieloma czynnikami, np. ze zmęczeniem.

Korzyści związane z użyciem manipulatorów w procesie produkcyjnym to:

- poprawa jakości produkcji,
- zwiększenie wydajności produkcji,
- obniżenie kosztów produkcji,
- wyeliminowanie błędów operatorskich,
- zmniejszenie długości postojów,
- wzrost elastyczności produkcji.

Pozostaje jeszcze jedna kwestia do rozwiązania na wstępie. Najbardziej nie lubiana przez wszystkich, bo zawsze nieprecyzyjna i jednostronna. Definicja – manipulator i robot. Kiedy manipulator można już nazwać robotem? Jakie funkcje musi posiadać manipulator, żeby można go było nazwać robotem? I wreszcie, co tak naprawdę oznacza słowo robot? Intuicyjnie rozróżniamy te pojęcia, ale jak intuicja ma się do rzeczywistości?

Słowo robot nie zostało stworzone przez przemysł ani przez osobę posiadającą przygotowanie techniczne. Po raz pierwszy użył jej w swojej sztuce czeski pisarz K. Čapek tworząc tamże urządzenie o ludzkim wyglądzie i posiadającym ludzkie uczucia. Do tej pory nie istnieje jasna i precyzyjna definicja określająca robota. Można pokusić się jedynie o określenie pewnych cech takiego urządzenia, jak autonomiczność, programowalność, mobilność, zakres zastosowań.

2. Budowa manipulatorów

Każdy manipulator, jakby nie był zdefiniowany, musi posiadać trzy podstawowe zespoły:

- zespół ruchu albo inaczej mówiąc jednostka kinematyczna - Jest to ta część manipulatora, która odpowiada za przeprowadzenie przemieszczenia elementu w procesie produkcyjnym. Składa się z pewnego mechanicznego rozwiązania, które roboczo możemy nazwać ramieniem, zespołu elementów napędowych, czujników oraz odpowiednio dobranej końcówki roboczej.
- układ zasilania napędów i końcówki roboczej - Wykorzystywana jest tutaj energia pneumatyczna, hydrauliczna, mechaniczna lub elektryczna albo jednocześnie kilka z nich.
- układ sterowania - Może to być proste rozwiązanie oparte na sterowniku PLC albo na dedykowanym sterowniku, jak w przypadku robotów przemysłowych.

Ze względu na sposób budowy jednostki kinematycznej manipulatory można podzielić na:

- modułowe - Projektant systemu wybiera te elementy, które są dostępne na rynku i buduje z nich własne rozwiązanie.

- pseudo modułowe - Zespoły posiadają zaprojektowaną przez producenta strukturę ruchu, ale w pewnych ograniczonych zakresach użytkownik może ją zmieniać.
- monolityczne - Jednostka stanowiąca zespół ruchu jest niezmienna. Ma to miejsce w robotach przemysłowych. Na potrzeby dostosowania manipulatora do potrzeb procesu istnieje możliwość zbudowania zespołu chwytającego.

We współczesnych manipulatorach pojawia się wiele punktów stanowiących dla urządzenia zmianę układu współrzędnych trajektorii ruchu. Mechanizmy kinematyczne budowane są obecnie jako połączenia odpowiednich liniowych lub obrotowych elementów kinematycznych. Połączenia mogą odbywać się w sposób szeregowy lub równoległy. Do opisywania funkcjonalności ramienia manipulatora używa się określenia ilości stopni swobody. Najprościej rzecz ujmując, stopień swobody jest to element ruchomy manipulatora. W odniesieniu do ramienia ludzkiego, zgięcie ręki w łokciu to jeden stopień, obrót ręki o pewien kąt to drugi punkt swobody.

3. Napędy osi manipulatorów

W manipulatorach każdy stopień swobody musi posiadać swój niezależny element napędowy. Do realizacji ruchów manipulatora stosuje się napędy hydrauliczne, pneumatyczne oraz elektryczne. Niekiedy występują również napędy mieszane. Początkowo w manipulatorach stosowano głównie napędy pneumatyczne i hydrauliczne. Znajdowały zastosowanie głównie przy przemieszczaniu ciężkich elementów na liniach montażowych. Z czasem wymagania stawiane przed manipulatorami wzrosły i pojawiły się nowe problemy, którym musiały sprostać napędy.

Wymagania, jakie obecnie robotyka stawia napędom to między innymi:

- wysoka niezawodność,
- łatwość sterowania w szerokich granicach prędkości obrotowych,
- niewielkie rozmiary,
- duża odporność na przeciążenia,
- małe znamionowe prędkości obrotowe,
- najlepiej brak bezwładności silników,
- krótkie czasy rozruchu i hamowania.

3.1. Napędy pneumatyczne

Manipulatory przemysłowe z napędami pneumatycznymi charakteryzują się stosunkowo niewielkim udźwigiem, pracują na ogół w układzie otwartym (bez sprzężenia zwrotnego), a skrajne położenia nastawiane są za pomocą ograniczników lub zderzaków. Zaletą tego typu napędu jest łatwość uzyskiwania powietrza do zasilania układu oraz możliwość łączenia układu z atmosferą po zakończeniu cyklu pracy.

Napęd pneumatyczny manipulatora można podzielić na następujące zespoły:

- zespół przygotowania powietrza,
- elementy sterujące – zawory i elektrozawory,
- elementy wykonawcze - siłowniki liniowe, wahadłowe, obrotowe.

Dla małych i pojedynczych rozwiązań blok przygotowania sprężonego powietrza stanowi wyposażenie manipulatora, w innych natomiast sprężone powietrze przygotowuje się w oddzielnych pomieszczeniach dla całej grupy manipulatorów, a następnie rozprowadzane jest ono przewodami instalacji pneumatycznej.

Elementy końcowe instalacji typu oddzielnik wilgoci, zawór redukcyjny czy smarownice kontrolują parametry powietrza, które dostaje się do infrastruktury manipulatora. Stosowanie wyżej wymienionych urządzeń jest nieodzowne dla zapewnienia poprawnej pracy manipulatora oraz instalacji pneumatycznej. Za pomocą zaworu redukcyjnego nastawia się ciśnienie sprężonego czynnika roboczego, doprowadzanego do elementów wykonawczych napędów, zgodnie z wymaganiami technicznymi danego manipulatora. Za zaworem umieszczany jest zwykle manometr służący do kontroli ciśnienia powietrza. Konieczne jest również stosowanie oddzielników wilgoci ze względu na szkodliwy wpływ pary wodnej znajdującej się w sprężonym powietrzu na pracę urządzeń pneumatycznych. Skraplająca się para wodna na elementach instalacji powoduje ich korozję, zwiększa opory tarcia, a w temperaturach ujemnych osadza się w postaci szronu na wewnętrznych ściankach kanałów, powoduje zmniejszenie przekrojów przepływowych. Natomiast smarownica zapewnia rozpylenie oleju niezbędnego do smarowania przemieszczających się części elementu wykonawczego i rozdzielaczy.

3.2. Napędy hydrauliczne

Kiedy w procesie produkcyjnym pojawiają się duże masy, które muszą się przemieszczać, wtedy pojawia się potrzeba zastosowania manipulatorów o napędzie hydraulicznym.

Najważniejsze zalety przemawiające za celowością stosowania tego typu rozwiązań to:

- duża szybkość działania w osiach,
- bezstopniowa regulacja prędkości elementu wyjściowego napędu,
- łatwość sterowania prędkością i kierunkiem ruchu,
- spokojny i płynny ruch siłowników wykonawczych,
- możliwość uzyskania małych prędkości ruchu elementu wykonawczego bez konieczności stosowania przekładni,
- mała wrażliwość na zmiany obciążenia i przeciążenia,
- duża trwałość (elementy napędu są smarowane przez czynnik roboczy).

Zespół napędu hydraulicznego manipulatora można podzielić na następujące elementy:

- zbiornik cieczy roboczej,
- zespół silnik elektryczny i pompa wyporowa,
- zespół filtrów cieczy roboczej,
- chłodnica płynu hydraulicznego.

W przypadku stosowania tego rodzaju napędu do sterowania manipulatorem konieczna jest stabilizacja ciśnienia w obwodzie hydraulicznym. W czasie sterowania napędem manipulatora niekorzystna jest skokowa zmiana zewnętrznego momentu statycznego powodowana nagłą zmianą obciążenia.

W każdym manipulatorze przemysłowym układ hydrauliczny służący do jego napędu składa się z podobnych elementów, jednak różne są rozwiązania konstrukcyjne tego napędu. Przykładowy układ składa się z pompy zębatej napędzanej silnikiem elektrycznym, która dostarcza olej pod żądanym ciśnieniem. Dopływem czynnika roboczego do

poszczególnych elementów sterują serwozawory. Ze zbiornika olej przechodzi przez filtr wyjściowy do pompy zębatej, a następnie do filtra wysokociśnieniowego. W obudowie tegoż filtra montowany jest zawór zwrotny, który przeciwdziała powrotom oleju do filtra w przypadku odłączenia układu, co mogłoby spowodować zniszczenie układu filtrującego. Przefiltrowany olej przechodzi do rurociągu rozprowadzającego, w skład którego wchodzi regulator ciśnienia serwozaworu obrotu, zaworu bezpieczeństwa sterowanego ciśnieniem, akumulator, elektromagnetyczny zawór bezpieczeństwa, a następnie rozprowadzany do wszystkich części manipulatora. Regulator ciśnienia wchodzący w skład rurociągu utrzymuje stałą wartość ciśnienia. Akumulator przyłączony do rurociągu ogranicza wahania ciśnienia oleju doprowadzanego przez pompę zębatą. W tego przyrządach napędów stosuje się również wymiennik ciepła (chłodnicę) z regulatorem temperatury oleju.

4. Roboty przemysłowe

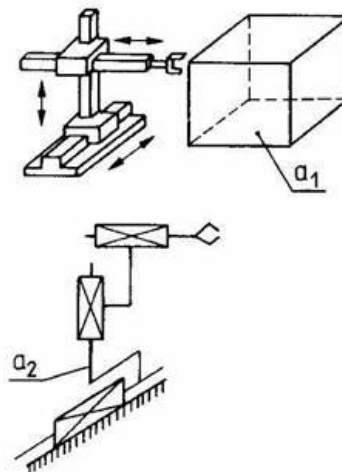
4.1. Rodzaje robotów

Roboty przemysłowe są również manipulatorami, jednakże stawia się przed nimi bardzo wysokie wymagania. Można powiedzieć, że są grupą manipulatorów do zadań specjalnych. Wykorzystywane są w wielu zadaniach w przemyśle i najogólniej można podzielić je na:

- roboty spawalnicze,
- roboty montażowe,
- roboty malarskie,
- roboty do przenoszenia materiałów i załadunku palet,
- roboty stosowane do obróbki materiałów,
- roboty laboratoryjne,
- roboty do pracy z materiałami niebezpiecznymi.

W rozwiązaniach przemysłowych ważniejsze jest to, jak robot zachowuje się w przestrzeni i w jaki sposób nią zarządza. Dlatego wprowadzono podział pod kątem struktur kinematycznych manipulatorów:

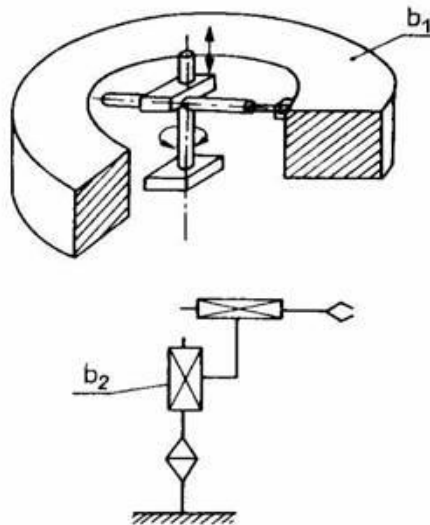
- manipulator w układzie kartezjańskim (prostokątnym) PPP – o trzech liniowych zespołach ruchu regionalnego oraz prostopadłościennych przestrzeniach ruchu;



Rys. 2.1. Manipulator w układzie kartezjańskim

Źródło: http://ppietras.w.interia.pl/teoria/s2_pliki/image006.jpg

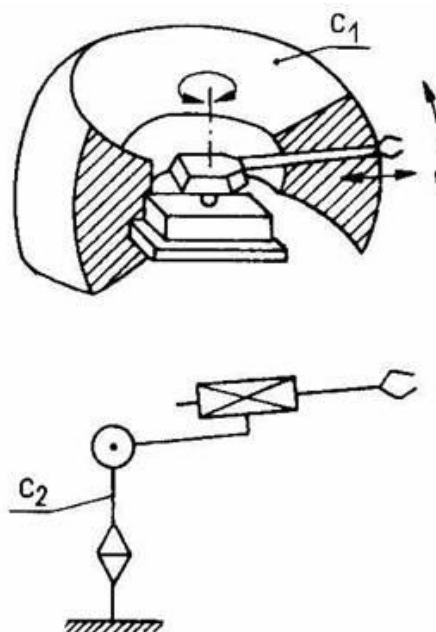
- manipulator w układzie cylindrycznym – o dwóch liniowych i jednym obrotowym zespole ruchu, walcowym układzie osi współrzędnych oraz cylindrycznych przestrzeniach ruchu;



Rys. 2.2. Manipulator w układzie cylindrycznym

Źródło: http://ppietras.w.interia.pl/teoria/s2_pliki/image008.jpg

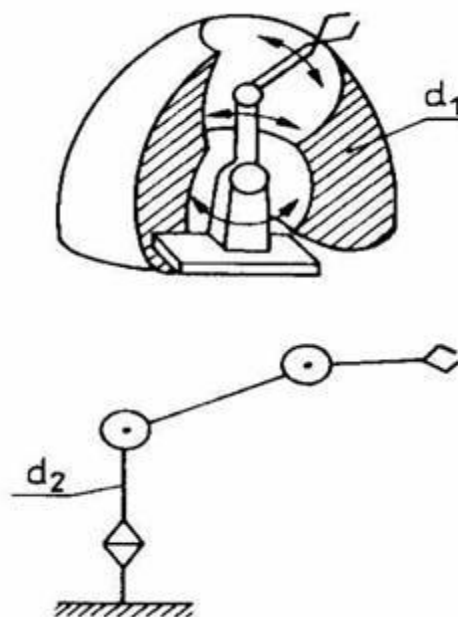
- manipulator w układzie sferycznym – o jednym liniowym oraz dwóch obrotowych zespołach ruchu regionalnego, biegunowym układzie osi współrzędnych oraz sferycznych przestrzeniach ruchu;



Rys. 2.3. Manipulator w układzie sferycznym

Źródło: http://ppietras.w.interia.pl/teoria/s2_pliki/image010.jpg

- manipulator w układzie przegubowym – o trzech obrotowych zespołach ruchu, podwójnie biegunowym lub przegubowym układzie osi współrzędnych oraz pierścieniowych przestrzeniach ruchu.



Rys. 2.4. Manipulator w układzie przegubowym

Źródło: http://ppietras.w.interia.pl/teoria/s2_pliki/image012.jpg

Zespół robota przemysłowego składa się z kilku podstawowych bloków funkcjonalnych:

- podstawa – płyta lub innego rodzaju element mechaniczny stanowiący pierwszy człon układu kinematycznego,
- korpus – konstrukcyjny element mechaniczny stanowiący obudowę elementów zespołów współpracujących podczas ruchu ramienia,
- ramię – część układu ruchu, którego zadaniem jest pozycjonowanie części chwytliwej,
- kiść i chwytak – zespół, zadaniem którego jest dokładne spozycjonowanie się i uchwycenie detalu,
- sterownik – mikroprocesorowy układ sterujący, kontrolujący i nadzorujący pracę robota,
- panel operatorski – rodzaj manipulatora z wyświetlaczem, umożliwiający zaprogramowanie urządzenia, sprawdzenie parametrów i wprowadzanie korekt w fazie rozruchu.

Struktura jednostki kinematycznej wraz z wymiarami schematu kinematycznego i zakresem przemieszczeń zespołów ruchu określają w sposób jednoznaczny przestrzeń ruchów mechanizmu, a po obliczeniach także przestrzeń ruchów chwytaka lub narzędzia. Wyróżnia się następujące przestrzenie:

- główną przestrzeń roboczą, w obrębie której przemieszcza się konstrukcyjnie zakończenie ostatniego, wolnego, ale nierozdzielnie związanego z mechanizmem jednostki kinematycznej członu, z reguły sprzęgu chwytaka;
- pomocnicza przestrzeń robocza, w obrębie której przemieszczają się dodatkowe człony (np. ruchy lokalne oraz wymienne chwytaki i narzędzia);
- przestrzeń kolizyjna to przestrzeń, w obrębie której zawierają się wszystkie elementy konstrukcyjne i przemieszczają się wszystkie zespoły ruchu (człony mechanizmu jednostki kinematycznej);

- strefa zagrożenia – jest to przestrzeń zagrożona przepisami lub normami bhp dla obsługi w czasie pracy jednostki kinematycznej.

4.2. Sensory

Przetworniki siły i naprężenia

Siła, z jaką chwytak obejmuje manipulowany przedmiot musi być odpowiednia do rodzaju manipulowanego przedmiotu. Do pomiaru siły uchwytu służą czujniki siły uchwytu. Pomiaru tego rodzaju wykonane są za pomocą czujników tensometrycznych.

Zastosowanie w budowie i wyposażeniu chwytaków przetworników siły i naprężeń jest ważne z następujących powodów:

- umożliwia określenie bardzo ważnych interakcji między przedmiotem manipulowanym a chwytakiem. Pomaga to w sterowaniu maksymalną siłą chwytaka, pozwala nie dopuścić do uszkodzeń manipulowanego przedmiotu,
- przetwornik siły umożliwia określenie niektórych współrzędnych pozwalających na orientację przedmiotu,
- w przypadku teleoperatorów sterowanych przez człowieka, sprzężenie zwrotne od siły uchwytu umożliwia człowiekowi bardziej precyzyjne manipulowanie.

Przetworniki dotyku „sztuczna skóra”

Stosowanie tzw. „sztucznej skóry” polega na zgrupowaniu większej liczby sensorów dotyku w formie matrycy. Pozwala to na uzyskanie całej powierzchni czulej na dotyk. Matryca taka pozwala na rozpoznanie kształtu obiektu na podstawie zarysu przedmiotu stykającego się z powierzchnią szczęki. Pozwala również na rozpoznanie położenia i orientację obiektu manipulacji w chwytaku.

Jednym ze sposobów wykonania przetwornika dotyku typu „sztuczna skóra” jest wykonanie jej w postaci sztucznej skóry pneumatycznej. Podstawowym elementem jest matryca mikrokopuł, która wykonana jest z cienkiej membrany metalowej. Mikrokopuły są sprężyste, przy czym każda z nich ma dwa stabilne położenia równowagi:

- położenie wypukłe - jeśli nie działają na nią żadne siły zewnętrzne poza ciśnieniem powietrza zasilającego,
- położenie wklęsłe – jeżeli nad mikrokopułą pojawi się odpowiednia siła nacisku.

Układy wizyjne są to układy, których zadaniem jest zbieranie informacji o otoczeniu robota metodami wizyjnymi. Czujnik wraz z układem obróbki informacji (zwykle jest to komputer) stanowi układ wizji maszynowej.

Przed układami wizyjnymi stawia się, jako najważniejsze, następujące zadania:

- zdolność rozpoznawania obiektów,
- zdolność zapamiętywania opisu obiektów oraz ich otoczenia,
- zdolność określania orientacji obiektów względem otoczenia,
- zdolność kontroli stanów obiektów.

Układy wizyjne

Do podstawowych zadań jakie stawia się przed układami wizji jest rozpoznawanie i identyfikacja obiektów. Jest to jeden z podstawowych warunków wstępnych do wykonania kolejnych operacji wykonywanych przez robota. Funkcją czujnika wizyjnego jest przekształcenie obrazu przestrzeni roboczej, a precyzyjniej, pierwotnego wyobrażenia obrazu, w taki sposób, aby przedstawiające go sygnały były adekwatne do aparatury, która dalej będzie je obrabiać (najczęściej spotykane są przekształcenia sygnału optycznego na elektryczny).

4.3. Zespoły chwytające

Manipulatory przemysłowe wyposażone są w różnego rodzaju elementy chwytające, których zadaniem najczęściej jest utrzymanie obiektu manipulacji w końcówkach chwytanych. Rola tego urządzenia zwanego chwytakiem polega na uchwyceniu obiektu manipulacji, trzymaniu obiektu w trakcie trwania czynności manipulacyjnych oraz jego uwolnieniu po zakończonym procesie manipulacji.

Istnieje bardzo duża grupa rozwiązań konstrukcyjnych chwytaków zależna od różnorodności przedmiotów poddawanych manipulacji oraz warunków, w jakich odbywa się manipulacja.

Duża liczba chwytaków przeznaczonych jest do określonych zadań manipulacyjnych. Często należy jednak skonstruować nowy chwytak do określonej manipulacji przedmiotem. Wykorzystanie standardowych chwytaków jest możliwe tylko w niewielkim procesie manipulacji.

Przystosowanie manipulatorów przemysłowych do wykonywania skomplikowanych manipulacji częściami maszyn (w swym kształcie) spowodowało konieczność konstrukcji urządzeń chwytających, różniących się zasadą działania, sposobem chwytania oraz zjawiskami zachodzącymi w trakcie chwytania. W zależności od zastosowania chwytaka do danej operacji technologicznej istnieją również różne sposoby chwytania.

Rozróżniamy następujące rodzaje chwytania przedmiotów:

- chwytanie przez obejmowanie (kształtowe),
- chwytanie cierne (siłowe),
- chwytanie przez przyssanie,
- chwytanie magnetyczne.

Chwytanie przez obejmowanie polega na otoczeniu manipulowanego przedmiotu przez palce chwytaka w taki sposób, który nie pozwoli przedmiotowi na przesunięcie, czyli pozbawi go całkowicie stopni swobody.

W praktyce przemysłowej stosuje się zwykle chwytanie siłowo – kształtowe, gdzie końcówki chwytne swoim kształtem ograniczają swobodę przemieszczania się obiektu, a jednocześnie wywierają na manipulowany przedmiot siły uniemożliwiające jego przemieszczenie.

Chwytnie cieie jest to rodzaj chwytania przedmiotu polegający na ściskaniu lub rozciąganiu przedmiotu przez palce chwytaka z siłą wystarczającą do wytworzenia siły tarcia statycznego, uniemożliwiającego jego przesunięcie.

Chwytnie przez przyssanie przedmiotu jest stosowane dla przedmiotów płaskich i cienkich, których przeciwległe płaszczyzny są trudno dostępne. W tym rodzaju chwytania chwyt wykonuje się tylko na jednej powierzchni przedmiotu.

Chwytnie magnetyczne jest stosowane dla przedmiotów ferromagnetycznych. Ten sposób uchwycenia manipulowanego przedmiotu można realizować w następujących wersjach:

- chwytanie elektromagnetyczne proste – przedmiot jest przytrzymywany w czasie przepływu prądu przez uzwojenie elektromagnesu i uwalniany przy zaniku prądu,
- chwytanie elektromagnetyczne z magnesem trwałym – przedmiot jest przytrzymywany przy braku prądu, a przytrzymywanie jest dodatkowo wspomagane elektromagnesem. Uwolnienie przedmiotu polega na zmianie kierunku przepływu prądu elektromagnesu,
- chwytanie z magnesem trwałym i uwolnienie pneumatyczne,
- chwytania elektromagnetyczne ze zwolnieniem pneumatycznym.

Chwytniki manipulatorów przemysłowych można podzielić na:

- a) mechaniczne,
- b) podciśnieniowe,
- c) magnetyczne.

Chwytniki mechaniczne stosowane są w manipulatorach przemysłowych do chwytania takich przedmiotów, jak wałki, tarcze, korpusy. Układ napędowy tych chwytaków może być:

- pneumatyczny,
- hydrauliczny,
- elektryczny,
- elektromagnetyczny,
- adhezyjny.

4.4. Napędy elektryczne osi robotów

Wśród stosowanych obecnie napędów elektrycznych w manipulatorach przemysłowych wymienić można:

- napędy prądu stałego z silnikami komutatorowymi,
- napędy prądu stałego z silnikami bezszczotkowymi,
- napędy prądu przemiennego,
- napędy z silnikami krokowymi.

Komutatorowe silniki elektryczne prądu stałego znalazły największe zastosowanie, jako napęd elektryczny manipulatorów. Tak szerokie zastosowanie wynika z możliwości prostej regulacji prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Stosowane są od dawna jako silniki prądu stałego z magnesami trwałymi w stojanie, z mechaniczną komutacją prądu w uzwojeniu wirnika (ze szczotkowym komutatorem). Silniki te są szeroko rozpowszechnione w napędach manipulatorów przemysłowych, jak również znalazły za-

stosowanie w serwonapędach obrabiarek sterowanych numerycznie. Obecnie silniki te są oceniane jako silniki wolnobieżne o zakresach prędkości obrotowych $n = 0-1200$ obr/min oraz $n = 0-2000$ obr/min.

Kolejnymi silnikami, jakie są używane do wprowadzenia w ruch manipulatorów są napędy prądu stałego z silnikami bezszczotkowymi. Są to silniki, w których zasada działania polega na odwróceniu rozwiązania silnika prądu stałego klasycznej budowy z mechaniczną komutacją prądu płynącego w uzwojeniach wirnika. Wirnik tegoż silnika utworzony jest ze spolaryzowanych promieniowo trwałych magnesów segmentowych, a uzwojenia prądowe są ułożone w lekko skośnych rowkach stojana.

Jako napędy manipulatorów przemysłowych używa się silniki prądu przemiennego. Są one proste w budowie, niezawodne w działaniu i można zaryzykować stwierdzenie, iż są bezobsługowe (prawie nie wymagające dozoru eksploatacyjnego). W skład takiego napędu prądu przemiennego oprócz silnika wchodzi również zespół zasilający – sterujący, które opierają się na technice tranzystorowej i mikroprocesorowej.

Zespoły takich napędów przystosowane są do współdziałania z mikroprocesorowymi układami sterowania, a tym samym spełniają stawiane przez technikę napędową następujące funkcje:

- bezstopniowa zmiana prędkości obrotowych w szerokim zakresie,
- pozycjonowanie kątowe dyskretne i ciągły obrót powiązany interpolacyjnie,
- unieruchomienie ramienia manipulatora momentem silnika.

Silniki skokowe stosowane w napędach manipulatorów przetwarzają impulsy elektryczne na przesunięcie kątowe lub liniowe. Stosuje się je w zautomatyzowanych układach napędowych o sterowaniu programowalnym. Silnik skokowy (krokowy) charakteryzuje się tym, że na każdy impuls sterujący wykonuje obrót o ściśle określony kąt – skok. Układ napędowy wyposażony w silnik skokowy reaguje na serie impulsów, co powoduje, iż wykonywany jest ruch o dokładnie określonej liczbie skoków, której odpowiada ściśle liczbie impulsów.

Silniki skokowe można podzielić na silniki wysokomomentowe oraz niskomomentowe. Wysokomomentowe silniki budowane są dość często ze żłóbkowym wirnikiem wykonanym z magnesów trwałych. Stojan tego silnika zbudowany jest w postaci wielobiegunowej, liczba biegunów stojana jest równa liczbie biegunów wirnika. Sterowanie tym silnikiem polega na cyklicznym zasilaniu uzwojeń biegunów napięciem o kształcie prostokątnym tak, aby wirnik wykonywał każdorazowo obrót o 1 podziałkę.

Bibliografia:

1. Olszewski M. 2002, Mechatronika, Warszawa: REA
2. Olszewski M. 2006, Podstawy mechatroniki. Podręcznik dla uczniów średnich i zawodowych szkół technicznych. Warszawa: REA
3. Olszewski M. 2009, Mechatronika i systemy mechatroniczne. Podręcznik dla uczniów średnich i zawodowych szkół technicznych. Warszawa: REA
4. Potrykus J., Krzyżanowski J. 2013 Poradnik mechatronika Warszawa : REA

Netografia:

1. http://www.robotyka.com/teoria_spis.php - teoria robotyki