

PWSZ Nowy Sacz
Instytut Techniczny

PODSTAWY
ROBOTYKI I MECHATRONIKI

WYKŁADY
Prof. Józefa GIERGIELA

Część 1
Wprowadzenie do
Robotyki

Nowy Sącz

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	6
1. WSTĘP	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Historia Robotyki	7
1.3. Pojęcia podstawowe i definicje	9
1.4. Dane statystyczne ilustrujące rozwój robotyki przemysłowej.....	11
2. SYSTEMOWE UJĘCIE PRACY	13
2.1. Praca bez narzędzi	13
2.2. Praca z narzędziami prostymi	14
2.3. Praca z narzędziami złożonymi	16
2.4. Automatyzacja obróbki przedmiotu	17
2.5. Praca z urządzeniami obsługiwanymi przez roboty	22
3. ELEMENTY SKŁADOWE I BUDOWA ROBOTÓW	24
3.1. Podstawowe układy robotów	24
3.2. Parametry opisujące manipulatory i roboty	27
4. KLASYFIKACJA I SYSTEMATYZACJA ROBOTÓW	33
4.1. Systematyzacja robotów i manipulatorów	33
4.2. Odmiany łańcuchów kinematycznych	39
4.3. Klasyfikacja na podstawie własności geometrycznych	41
4.4. Klasyfikacja na podstawie budowy jednostki kinematycznej	53
4.5. Klasyfikacja ze względu na obszar zastosowań	54
5. CHWYTAKI ROBOTÓW	56
5.1. Klasyfikacja chwytaków	57
5.2. Wyposażenie chwytaków	71
5.3. Przeniesienie napędu chwytaka	73
5.4. Obliczenia chwytaka.....	75
6. KINEMATYKA ROBOTÓW	87
6.1. Obroty	87

WPROWADZENIE DO ROBOTYKI

6.2. Składanie obrotów	91
6.3. Przekształcenia jednorodne	94
6.4. Notacja Denavita-Hartenberga	97
6.5. Kinematyka prosta.....	99
6.6. Kinematyka odwrotna.....	110
7. DYNAMIKA ROBOTÓW	114
7.1. Równania Lagrange'a II rodzaju	114
7.2. Równania Newtona-Eulera.....	117
7.3. Dynamika odwrotna	118
7.4. Dynamika prosta.....	121
8. NAPĘDY ROBOTÓW.....	124
8.1. Napęd elektryczny	127
8.2. Napęd hydrauliczny	137
8.3. Napęd pneumatyczny	151
8.4. Charakterystyki pozycjonowania.....	158
9. OGRANCZNIKI I PRZETWORNIKI RUCHU.....	163
9.1. Ograniczniki zderzakowe i wyłączniki drogowe.....	163
9.2. Przetworniki pomiaru położenia ramion	166
9.3. Przetworniki sił i naprężeń	169
9.4. Przetworniki dotykowe.....	171
10. STEROWANIE ROBOTÓW	176
10.1. Podział układów sterowania	176
10.2. Struktura funkcjonalna układu sterowania	177
10.3. Warstwy sterowania napędów	181
10.4. Warstwa koordynowania napędów.....	182
10.5. Warstwa programowania trajektorii ruchu	183
10.6. Warstwa wyznaczania trajektorii ruchu.....	184
10.7. Warstwa rozpoznawania przedmiotów	185
11. BADANIA ROBOTÓW.....	186

WPROWADZENIE DO ROBOTYKI

11.1. Rodzaje i przeznaczenie badań robotów.....	186
11.2. Badania symulacyjne.....	186
11.3. Próby funkcjonalne.....	187
11.4. Badania kinematyczne.....	188
11.5. Badania dynamiczne.....	191
11.6. Badania eksploatacyjne.....	192
12. ASPEKTY EKONOMICZNE I SOCJALNE ROBOTYKI.....	193
12.1. Wprowadzenie.....	193
12.2. Stan robotyki w krajach i na świecie.....	194
12.3. Aspekty ekonomiczne i społeczne.....	195
12.4. Perspektywy rozwoju robotyzacji.....	197
13. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA.....	199

PRZEDMOWA

Niniejsze opracowanie przeznaczone jest dla studentów AGH, Politechnik i PWSZj, mogą z niego korzystać studenci wydziałów mechanicznych uczelni technicznych. Zawiera teorię, przykłady wraz z metodyką rozwiązań. Pozwala to na lepsze zrozumienie teorii związanej z analizowanym zagadnieniem. Dla ambitnych przygotowano zestawy zadań do samodzielnego rozwiązywania. Wychodząc na przeciw ciągle rozwijającym się technikom obliczeń komputerowych, do niektórych przykładów zostały dołączone rozwiązania z użyciem pakietu obliczeń symbolicznych MAPLE™ oraz obliczeń w programie MATLAB™-SIMULINK. Podejście to ma tą zaletę, że wynik otrzymuje się w postaci symbolicznej. Dodatkowo znacznie skraca to czas potrzebny do rozwiązania zadania i unika się pomyłek często zdarzających się podczas analizowania złożonych zagadnień.

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Robotyka jest stosunkowo nową dziedziną nauki, która łączy różne tradycyjne gałęzie nauk technicznych. Zrozumienie złożoności budowy robotów i ich zastosowań wymaga znajomości zagadnień elektrycznych, mechanicznych, inżynierii przemysłowej, nauk komputerowych, ekonomii i matematyki. Nowe działy inżynierii, takie jak inżynieria wytwarzania, inżynieria zastosowań i inżynieria wiedzy, w znacznym stopniu dotyczą problemów z obszaru robotyki i szeroko pojętej automatyki przemysłowej.

1.2. Historia Robotyki

Pojęcie „ROBOT” w literaturze wystąpiło po raz pierwszy w sztuce czeskiego pisarza Karel’a Čapka (1890-1938) R.U.R (Rossum’s Universal Robots) w roku 1920. Słowo „robot” oznacza w języku czeskim pracę lub służbę przymusową.

W roku 1942 Isaac Assimov w krótkim opowiadaniu „Runaround” po raz pierwszy użył słowa robotyka. W kolejnych latach Assimov w swoich utworach niejednokrotnie poruszał tematy robotyki, a w roku 1950 wydał zbiór opowiadań pod tytułem „Ja, robot”. Assimov wprowadził trzy prawa robotyki, według których:

- Prawo zerowe:* Robot nie może szkodzić ludzkości, ani nie może, przez zaniedbanie, narazić ludzkości na szkodę.
- Prawo pierwsze:* Robot nie może zranić istoty ludzkiej, ani nie może przez zaniedbanie narazić człowieka na zranienie, chyba, że narusza to prawo o wyższym priorytecie.
- Prawo drugie:* Robot musi spełniać polecenia wydawane przez człowieka, poza poleceniami sprzecznymi z prawami o wyższym priorytecie.
- Prawo trzecie:* Robot musi chronić samego siebie dopóki dopóty nie jest to sprzeczne z prawem o wyższym priorytecie.

Po gwałtownym rozwoju techniki w czasie drugiej wojny światowej w 1956 roku G.C. Devol i J.S. Engelberger rozmawiając o twórczości Assimov’a postanowili stworzyć działający egzemplarz robota. Engelberger założył firmę „UNIMATION” zajmującą się automatyzacją w szerokim tego słowa znaczeniu i będącą pierwszą firmą produkującą roboty.

Pierwszym robotem stworzonym przez „Unimation” był robot nazwany „UNIMATE”. W wyniku, czego Engelberger został nazwany ojcem robotyki. Pierwszy Unimate zainstalowany został w fabryce General Motors w Trenton przy obsłudze wysokociśnieniowej maszyny odlewniczej, w kolejnych latach roboty Unimate zostały przystosowane do pracy także w innych gałęziach przemysłu, a firma Unimate do dzisiaj produkuje roboty przemysłowe.

WPROWADZENIE DO ROBOTYKI

Według definicji wprowadzonej w 1979 roku przez Robotics Industries Association „**Robot** to programowalny, wielofunkcyjny manipulator zaprojektowany do przenoszenia materiałów, części, narzędzi lub specjalizowanych urządzeń poprzez różne programowalne ruchy, w celu realizacji różnorodnych zadań”.

Nieco inną definicję podaje słownik Webster’a: „**Robot** - urządzenie automatyczne wykonujące czynności normalnie przyporządkowane człowiekowi lub maszyna człękkształtna”

Podstawową cechą robotów jest ich programowalność, co pozwala bez większych kłopotów przystosować robota do zmiennych wymagań i środowisk pracy.

Początkowo roboty były projektowane do wykonywania różnych czynności związanych z przenoszeniem materiałów. Program pracy zawierał zamkniętą sekwencję ruchów z punktu A, zamknięcie chwytaka (uchwycenie przenoszonego przedmiotu), ruch do punktu B, otwarcie chwytaka (odłożenie przenoszonego przedmiotu). Roboty te nie były wyposażone w żadne zewnętrzne czujniki. Dopiero zastosowanie robotów do bardziej skomplikowanych czynności jak spawanie, stępienie krawędzi czy montaż zmusiło konstruktorów do stworzenia robotów posiadających możliwość wykonywania bardziej skomplikowanych ruchów i wyposażenie ich w czujniki pozwalające im na większą interakcję z otoczeniem.

Poniżej przedstawiono ważne daty w historii robotyki:

- 1920 – Słowo robot stało się znane dzięki sztuce „R.U.R.” Karel’a Čapka.
- 1938 – Issac Assimov umieszcza termin robotyka w swojej noweli science-fiction i formułuje Trzy Prawa Robotyki.
- 1947 – Opracowanie pierwszego teleoperatora z serwonapędem elektrycznym
- 1948 – Opracowanie teleoperatora ze sprzężeniem zwrotnym od siły.
- 1949 – Rozpoczęcie badań nad obrabiarkami sterowanymi numerycznie.
- 1954 – Zaprojektowanie pierwszego programowalnego robota przez Georg’a Devola.
- 1956 – Zakupienie praw do robota Devola i założenie firmy Unimation przez Josepha Engelberga, studenta fizyki na Uniwersytecie Columbia.
- 1958 – Pierwszy prototyp robota Unimate zainstalowany w fabryce General Motors.
- 1961 – Pierwszy seryjny robot Unimate zainstalowany w fabryce General Motors w Trenton w stanie New Jersey.
- 1961 – Opracowanie pierwszego robota ze sprzężeniem zwrotnym od siły.
- 1963 – Opracowanie pierwszego systemu wizyjnego dla robota.
- 1969 – W Unimate General Motors rozpoczęto montaż nadwozi Chevrolet’a Vega przy pomocy robotów Unimate.
- 1970 – General Motors staje się pierwszą firmą wykorzystującą systemy wizyjne w zastosowaniach przemysłowych. System Consight zostaje zainstalowany w zakładzie w St. Catharines, Ontario, Kanada.
- 1971 – Opracowanie robota *Stanford Arm* na Uniwersytecie Stanford.
- 1972 – Na Uniwersytecie w Nottingham w Anglii stworzono *SIRCH*, układ

- zdolny do rozpoznawanie dowolnie zorientowanych dwuwymiarowych części.
- 1972 – Kawasaki instaluje zrobotyzowaną linię produkcyjną w zakładach Nissana, roboty zostały dostarczone przez firmę Unimation.
 - 1973 – ASEA część przedsiębiorstwa Vasteras ze Szwecji prezentuje roboty elektryczne IRb 6 i IRb 60 przeznaczonych do automatycznych operacji szlifierskich.
 - 1973 – Opracowanie pierwszego języka programowania robotów (WAVE) na Uniwersytecie Stanford.
 - 1974 – Wprowadzenie przez firmę Cincinnati Milacron robota ze sterowaniem komputerowym.
 - 1975 – Odnotowanie pierwszego zysku finansowego przez firmę Unimation.
 - 1978 – Wprowadzenie przez firmę Unimation robota *PUMA (Programmable Universal Assembly)*, opracowanego na podstawie projektu powstałego w trakcie badań w fabryce General Motors.
 - 1979 – Wprowadzenie robotów SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) w Japonii.
 - 1986 – Rozpoczęcie prac nad robotem humanoidalnym przez firmę *HONDA*.
 - 1998 – Robot mobilny *Sojourner* ląduje na Marsie 4 lipca.

Kolejnymi kierunkami rozwoju robotów będzie tworzenie coraz bardziej uniwersalnych urządzeń, w coraz większym stopniu niezależnych.

1.3. Pojęcia podstawowe i definicje

Robotyka to dział nauki i techniki zajmujący się problemami mechaniki, sterowania, projektowania, pomiarów, zastosowań oraz eksploatacji manipulatorów i robotów.

Obszar zastosowania manipulatorów i robotów jest bardzo duży, obecnie jedynie względy ekonomiczne mogą ograniczać proces robotyzacji przemysłu.

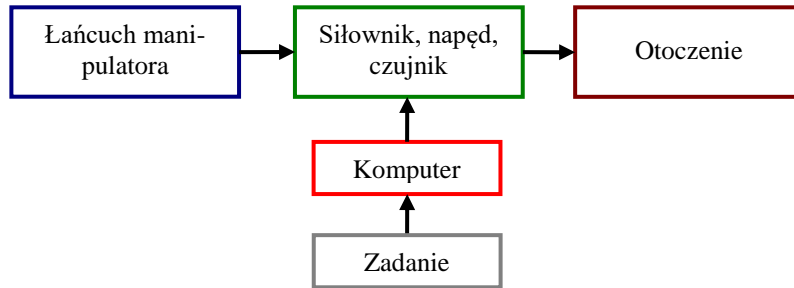
W dzisiejszych czasach roboty znalazły zastosowanie w transporcie, medycynie, produkcji przemysłowej, budownictwie oraz środowiskach nieprzyjaznych człowiekowi, czyli w kosmosie i głębinach morskich.

Jednym z fundamentalnych pojęć związanych z robotyką jest pojęcie **maszyny cybernetycznej**, jest to sztuczne urządzenie przeznaczone do częściowego lub całkowitego zastępowania funkcji energetycznych, fizjologicznych i intelektualnych człowieka. Poprzez funkcje energetyczne należy rozumieć zastępowanie pracy fizycznej, funkcje fizjologiczne jako zastępowanie organów, natomiast funkcje intelektualne jako właściwości adaptacyjne maszyny w zmieniającym się środowisku.

Przy takiej definicji maszyny cybernetycznej, **mechanizm cybernetyczny** można zdefiniować jako część maszyny cybernetycznej zastępującej czynności ruchowe człowieka.

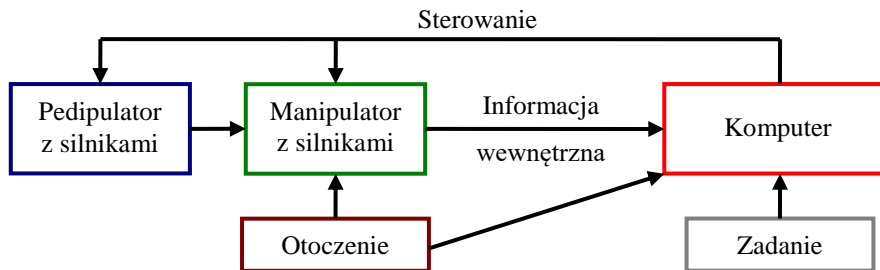
Manipulator jest to mechanizm cybernetyczny przeznaczony do realizacji niektórych funkcji kończyny górnej człowieka. Należy wyróżnić dwa rodzaje funkcji

manipulatora: manipulacyjną - wykonywana przez chwytak i wsięgnikową - realizowaną przez ramię manipulatora. Schemat blokowy manipulatora przedstawia rys.1.1.



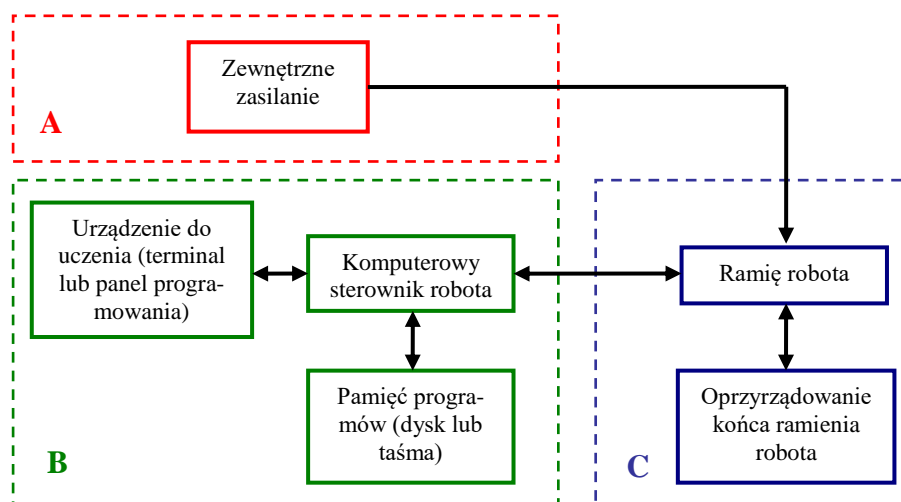
Rys.1.1. Schemat blokowy manipulatora

Pedipulator jest to kończyna dolna „noga” maszyny kroczącej. Może być układem jedno lub kilku członowym (rys.1.2).



Rys.1.2. Schemat blokowy pedipulatora i manipulatora

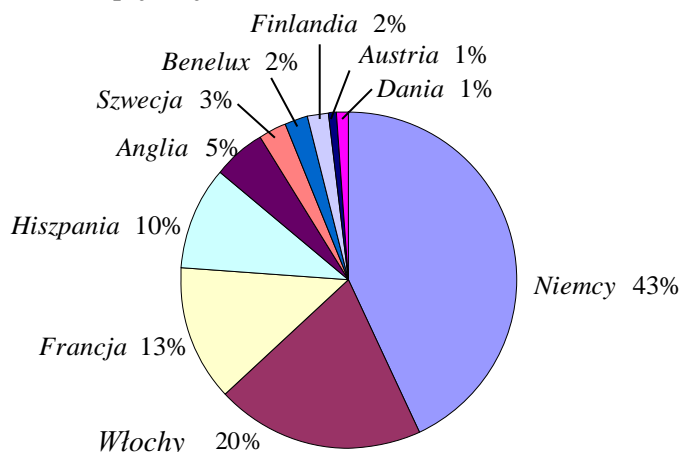
Robot określany jest również jako urządzenie techniczne przeznaczone do realizacji niektórych funkcji manipulacyjnych i lokomocyjnych człowieka, posiadające określony poziom energetyczny, informacyjny i inteligencji maszynowej. Inteligencja maszynowa to autonomia działania w pewnym środowisku. Schemat blokowy robota został przedstawiony na rys.1.3.



Rys.1.3. Schemat blokowy robota
A - układ zasilania, B - układ sterowania, C - układ ruchu

1.4. Dane statystyczne ilustrujące rozwój robotyki przemysłowej

Na rys.1.4 przedstawiono procentowy udział robotów zainstalowanych w przemyśle krajów Unii Europejskiej.



Rys.1.4. Procentowy udział robotów zainstalowanych w przemyśle krajów Unii Europejskiej

Międzynarodowa Federacja Robotyki (IFR) wspólnie z Europejską Komisją Ekonomiczną sporządza corocznie raporty zawierające dane statystyczne o rozwoju robotyki w uprzemysłowionych krajach świata.

WPROWADZENIE DO ROBOTYKI

Tabela 1.1. Liczba zainstalowanych robotów w przemyśle w wybranych krajach w latach 1984-2002

Kraj/Rok	1984	1994	1999	2000	2001	2002
Japonia	67000	377025	402200	389442	361232	350169
USA	13000	55000	92900	89880	97257	103515
Niemcy	6600	48840	81200	91184	99195	105217
Włochy	2600	21976	35000	39238	43911	46881
Francja	bd	12992	18200	20674	22753	24277
W. Brytania	2432	9275	11500	12344	13411	13651
Austria	176	2217	3000	3046	3153	3521
Kraje Beneluksu	bd	3600	7800	8211	8590	8674
Kraje b. ZSRR ^{*)}	bd	4000	10000	5000	5000	5000
Finlandia	177	1295	2300	2647	2927	3023
Hiszpania	525	4516	10500	13163	16378	18352
Szwecja	1745	5450	5600	6276	6714	6846
Australia	528	2063	2900	2833	2953	3310
Korea (Rep. Płd.)	bd	7200	33700	37987	41267	44265
Singapur	121	3950	5300	5370	5458	5346
Tajwan	248	3297	6400	6942	7319	7491
Pozostałe kraje	778	11369	13500	16335	18501	19706
Polska	bd	660	500	462	520	644
Razem	95930	574725	742500	751034	756539	769888
^{*)} Dla krajów b. ZSRR liczby robotów wg danych szacunkowych						

Z tabeli 1.1 wynika, że w końcu 2002 roku w eksploatacji było ok. 770tys. robotów przemysłowych. Zdecydowana większość (ponad 40% wszystkich robotów na świecie) w Japonii, następnie w USA, w Niemczech i we Włoszech.

2. SYSTEMOWE UJĘCIE PRACY

Od niepamiętnych czasów czynności zmierzające do kształtowania i opanowania otoczenia były jednymi z najważniejszych i najbardziej charakterystycznych czynności ludzkich. Do czynności tych należy:

- tworzenie coraz doskonalszych narzędzi, umożliwiających coraz skuteczniejsze oddziaływanie na otoczenie;
- dążenie do coraz lepszego poznania otoczenia, aby określić najbardziej efektywne sposoby oddziaływania na otoczenie.

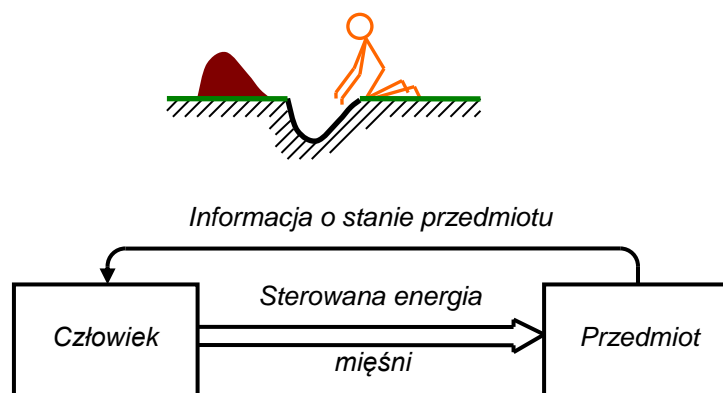
Na uwagę zasługuje to, że właściwie wszystkie znane formy pracy ludzkiej można opisywać posługując się pojęciami teorii systemów i sterowania. Ze względu na bardzo dużą przydatność tych pojęć przy opisie konstrukcji i zasad działania robotów jest pożądane zaznajomienie się z tymi pojęciami właśnie na przykładach najbardziej prostych i znanych, a związanych z pracą ludzką.

2.1. Praca bez narzędzi

Najbardziej prymitywny etap rozwoju pracy ludzkiej to etap pracy **bez narzędzi**. Charakteryzuje się on tym, że człowiek oddziałuje na przedmiot swojego otoczenia bezpośrednio swoimi rękoma, wykorzystując przy tym energię mięśni sterowaną za pomocą systemu nerwowego.

Oddziaływanie na przedmiot wymaga znajomości wielu jego właściwości, całości kształt, których tworzy **stan przedmiotu**. W oparciu o informację o stanie przedmiotu (np. o głębokości i średnicy dołu, barwie ziemi, twardości gruntu itp.) przekazywanej do systemu nerwowego człowieka za pomocą naturalnych przetworników pomiarowych, jakim są zmysł wzroku, dotyku, słuchu, węchu i inne, może on modyfikować swoje oddziaływanie na przedmiot. Charakterystyczną cechą najprostszej nawet pracy ludzkiej jest, więc istnienie **sprzężenia zwrotnego** pomiędzy przedmiotem a człowiekiem (*rys.2.1*).

Istota **sprzężenia zwrotnego** w przypadku pracy bez narzędzi polega na tym, że oddziaływanie człowieka na przedmiot jest uzależnione od informacji o stanie przedmiotu, przekazanej człowiekowi za pośrednictwem jego zmysłów.



Rys.2.1. Schemat blokowy pracy bez narzędzi

Kolejną podstawową cechą najprostszej pracy ludzkiej jest jej **celowość**. Celem działania w rozpatrywanym przykładzie z rys.2.1 może być np. wykopanie dołu o odpowiednich rozmiarach lub dotarcie do żyły wodnej.

Należy zwrócić uwagę na to, że wybór zmiennych tworzących stan przedmiotu zależy od celu działania.

Zależnie, bowiem od celu działania, istotnymi będą tylko niektóre spośród bardzo wielu właściwości przedmiotu, np. w rozpatrywanym przykładzie twardość gruntu, ilość kamieni w gruncie, wilgotność gruntu. Nieistotnymi będą natomiast takie zmienne jak radioaktywność gruntu, barwa gruntu lub rodzaj i ilość bakterii żyjących w jednostce objętości gruntu. Reasumując:

Stanem przedmiotu ze względu na określony cel działania nazywa się wszystkie te zmienne charakteryzujące przedmiot, których znajomość jest potrzebna do osiągnięcia postawionego celu.

W dalszym ciągu, ilekroć zostanie użyty krótszy termin „stan przedmiotu” należy pamiętać o tym, że jest on określony ze względu na jakiś konkretny cel działania. Stan przedmiotu dogodnie można przedstawić w postaci wektora, którego składowe to: twardość gruntu, wilgotność gruntu itd. noszą nazwę **współrzędnych stanu**.

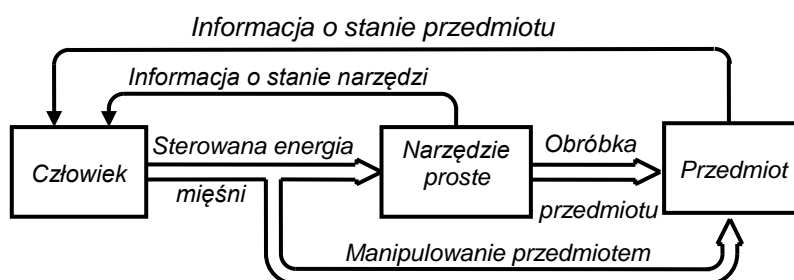
Całokształt dotychczasowych doświadczeń, umożliwiający predykcję skutków różnych oddziaływań na przedmiot, nazywa się **modelem przedmiotu**.

W dalszym ciągu okaże się, że wprowadzone dla opisu najprostszej pracy ludzkiej pojęcia: **celu działania, stanu przedmiotu, modelu przedmiotu i sprzężenia zwrotnego**, są pojęciami bardzo ogólnymi, szczególnie przydatnymi do opisu bardziej złożonych form pracy ludzkiej oraz realizowanej za pomocą robotów i manipulatorów.

2.2. Praca z narzędziami prostymi

Na etapie pracy z narzędziami prostymi, tj. narzędziami napędzanymi energią mięśni ludzkich i wspomaganych pracą bez narzędzi, można również wyróżnić: cel

działania, stan przedmiotu, model przedmiotu i sprzężenie zwrotne od stanu przedmiotu. Nowymi elementami systemowymi tej pracy (rys.2.2) są:



Rys.2.2. Schemat blokowy pracy z narzędziami prostymi, wspomaganej pracą bez narzędzi

- **model narzędzia**, będący całokształtem dotychczasowych doświadczeń ze stosowania tego narzędzia, umożliwiających predykcję skutków różnego użycia narzędzia. Model ten, podobnie jak model przedmiotu, jest modelem nieprecyzyjnym, rozmytym;
- **stan narzędzia**, będący zbiorem wszystkich tych zmiennych charakteryzujących narzędzie, których znajomość jest potrzebna do osiągnięcia wytyczonego celu. Współrzednymi stanu narzędzia może być np. prędkość młota w chwili uderzenia, kąt uderzenia, punkt uderzenia;
- **sprzężenie zwrotne od stanu narzędzia**, informujące człowieka za pośrednictwem jego zmysłów o wszystkich istotnych, do realizacji celu, współrzednych stanu narzędzia.

Modele przedmiotu i narzędzia na etapie pracy z narzędziami prostymi są równie mało precyzyjne i rozmyte jak modele przedmiotów na etapie pracy bez narzędzi. Osiągnięcie przez człowieka bardzo złożonych celów w oparciu o tak mało precyzyjne modele jest możliwe przede wszystkim dzięki:

- dużej liczbie różnych, bardzo złożonych przetworników pomiarowych (zmysłów), którymi dociera do niego informacja o stanie przedmiotu i narzędzia oraz
- jego bardzo dużej inteligencji, umożliwiającej mu rozpoznawanie wspólnych cech różnych sytuacji, szybkie uczenie się metodą prób i błędów w trakcie wykonywania pracy, szybką adaptację do nowych, nieznanymi właściwościami przedmiotu lub narzędzia.

Jak się okaże w dalszym ciągu, przejście części zadań człowieka przez robota bez porównania mniej inteligentnego i dysponującego małą liczbą prymitywnych prze-

tworników pomiarowych sprawi, że model przedmiotu, którym będzie musiał dysponować będzie znacznie bardziej precyzyjny aniżeli model, który wystarczał człowiekowi.

2.3. Praca z narzędziami złożonymi

Kolejnym ważnym krokiem na drodze rozwoju pracy ludzkiej było rozpowszechnianie się **narzędzi złożonych**, mających zewnętrzne źródła energii (np. ciepłej lub elektrycznej). Na etapie tym:

- naturalne czujniki pomiarowe człowieka (jego zmysły) zostają uzupełnione złożonym oprzyrządowaniem pomiarowym. Elementami tego oprzyrządowania są np. przetworniki przesunięć, sił, momentów, temperatur, czasów i inne. Umożliwiają one obiektywne określenie wielu ważnych współrzędnych stanu przedmiotu i narzędzia;
- modele przedmiotu i narzędzia podlegają częściowej **formalizacji**, tzn. są częściowo wyrażone w postaci precyzyjnych relacji matematycznych, wiążących skutki oddziaływania na przedmiot i skutki użycia narzędzia ze sposobem oddziaływania na przedmiot i sposobem użycia narzędzia.
- sposób osiągania celu działania zostaje w pewnym stopniu sformalizowany tj. przedstawiony w postaci ciągu kolejnych, dokładnie zdefiniowanych etapów pracy.

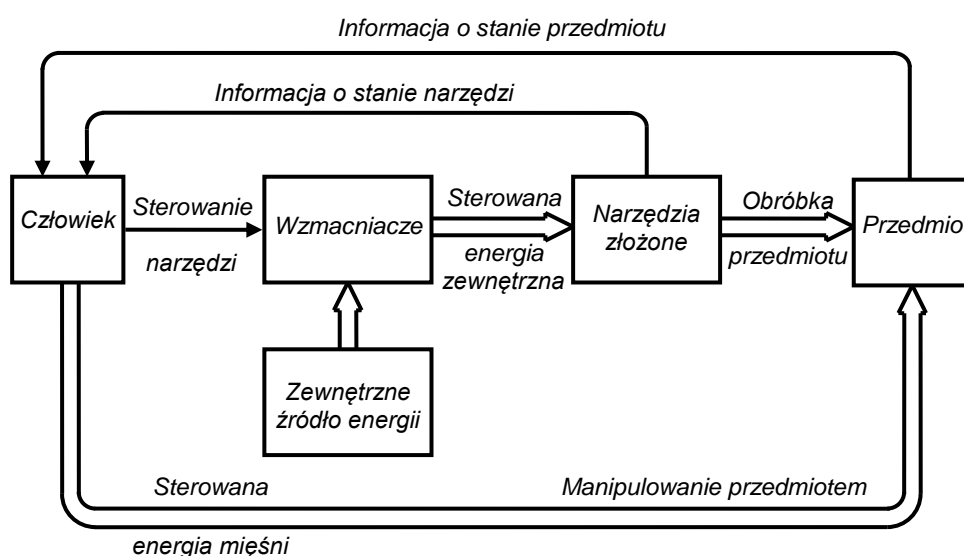
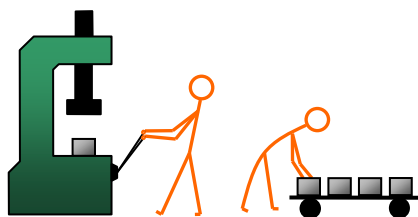
Rola człowieka w procesie obróbki przedmiotu zostaje na omówionym etapie (rys.2.3) ograniczona do czynności ręcznego manipulowania przedmiotem oraz do **sterowania systemem** złożonego z:

- wzmacniaczy przekazujących energię z zewnętrznego źródła do narzędzia,
- narzędzia,
- przedmiotu obróbki.

Sterowaniem systemem nazywa się takie oddziaływanie na wielkości wyjściowe sterujące tego systemu, które doprowadzą do realizacji celu postawionego przed tym systemem. System sterowany nazywa się **obiekttem sterowania**.

Wielkościami wejściowymi sterującymi w przypadku omawianego sterowania będą położenia przycisków, nastawników, pokręteł i dźwigni, umożliwiających oddziaływanie na przebieg obróbki przedmiotu. Podczas sterowania ręcznego człowiek zmienia w czasie wielkości wejściowe sterujące obiektem w zależności od podstawionego celu i obserwowanych współrzędnych stanu przedmiotu i narzędzia w taki sposób, by postawiony cel osiągnąć.

W przypadku pracy z narzędziami prostymi człowiek również **sterował** narzędziami (tzn. ustalał odpowiednio drogę ruchu młota, jego kąt uderzenia, prędkość młota, miejsce uderzenia), lecz równocześnie **napędzał** narzędzia (tzn. dostarczał im swojej energii mięśniowej).



Rys.2.3. Schemat blokowy pracy z narzędziami złożonymi, mającymi zewnętrzne źródła energii i sterowanymi przez człowieka, wspomaganą pracą bez narzędzi

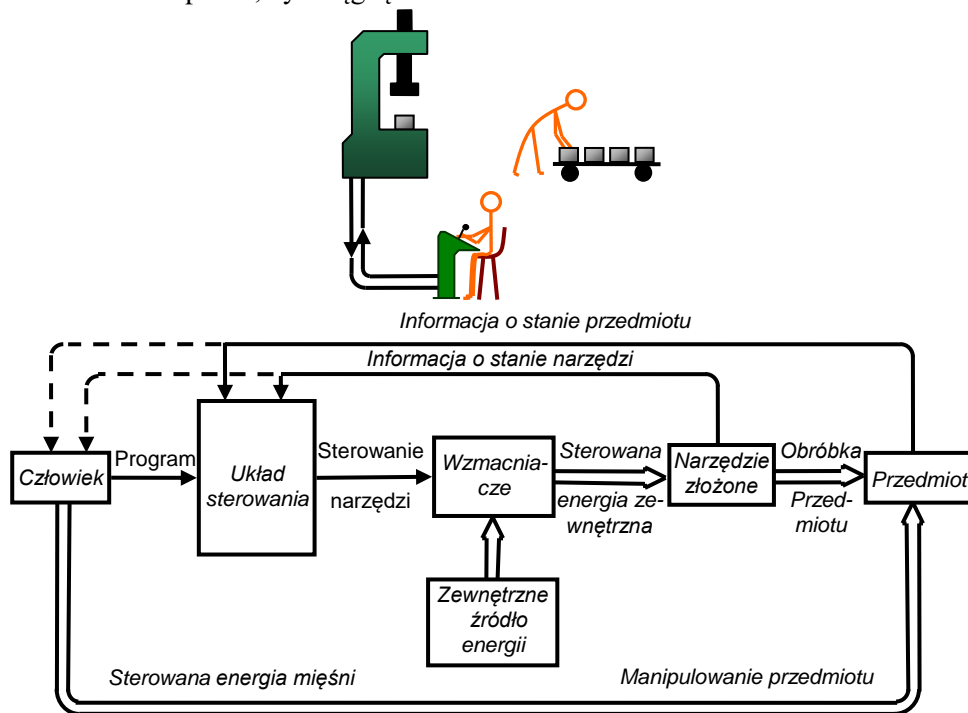
Nierozłączność sterowania i napędzania w przypadku pracy z narzędziami prostymi była powodem, dla którego przy jej omawianiu nie wprowadzano rozróżnienia pomiędzy sterowaniem a napędzaniem. W przypadku pracy z narzędziami złożonymi sterowanie narzędzi (np. załączenie prasy, wybór siły tłoczenia) realizowane przez człowieka zostaje oddzielone od napędzania narzędzi (tzn. dostarczania od niego odpowiedniej ilości energii z zewnętrznego źródła) realizowanego przez wzmacniacze.

2.4. Automatyzacja obróbki przedmiotu

Kolejnym etapem rozwoju pracy ludzkiej jest etap **automatyzacji obróbki przedmiotu** (rys.2.4). Na etapie tym sterowanie narzędzia złożonego jest realizowane przez **układ sterujący**, do którego człowiek wprowadza **program obróbki przedmiotu**. Program ten jest zapisem **algorytmu sterowania** w określonym języku programowania.

Algorytm sterowania jest ciągiem operacji arytmetycznych i logicznych, określających przebiegi czasowe wielkości wejściowych sterujących obiektem sterowania w zależności od:

- celu sterowania,
- bieżącego czasu,
- współrzędnych stanu obiektu sterowania
- w taki sposób, by osiągnąć cel sterowania.



Rys.2.4. Schemat blokowy pracy z narzędziami złożonymi, sterowanymi automatycznie przez układy sterujące zaprogramowane przez człowieka, wspomaganą pracą bez narzędzi

Przykładem algorytmu sterowania może być ciąg operacji arytmetycznych i logicznych wyznaczających przebiegi czasowe prędkości podłużnej i poprzecznej suportu obrabiarki oraz prędkość kątową wrzeciona w zależności od zadanego kształtu wyrobu (cel sterowania), czasu, początkowego położenia suportu oraz sygnałów pochodzących od czujników położenia suportu.

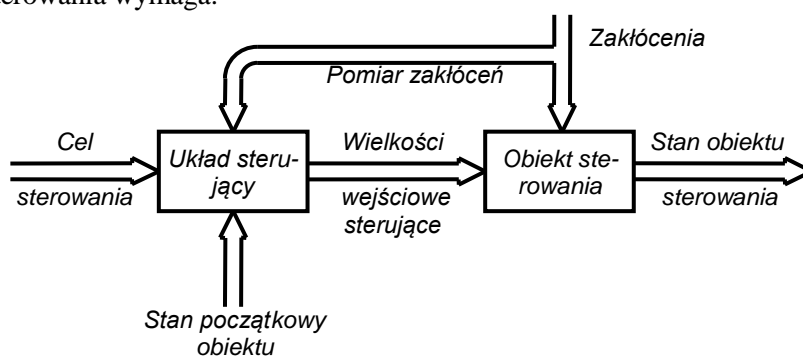
Zależnie od tego czy algorytm sterowania korzysta na bieżąco ze znajomości współrzędnych stanu obiektu sterowania, wyróżnia się:

- **sterowanie w torze otwartym** charakteryzujące się tym, że przebieg wielkości wejściowych sterujących systemem zostaje, wyznaczony bez bieżącej znajomości zmieniających się w trakcie sterowania współrzędnych stanu obiektu sterowania;

- **sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym** charakteryzujące się tym, że znajomość wszystkich lub niektórych współrzędnych stanu obiektu, w sposób ciągły, periodyczny lub sporadyczny jest na bieżąco wykorzystywana do wyznaczania przebiegów czasowych wielkości wejściowych sterujących tego obiektu

2.4.1. Właściwości sterowania w torze otwartym

Najważniejszą cechą sterowania w torze otwartym (rys.2.5) jest to, że osiągnięcie celu sterowania wymaga:



Rys.2.5. Schemat blokowy sterowania w torze otwartym

1. Znajomości dokładnego, całkowicie sformalizowanego modelu systemu dla postawionego celu sterowania.
2. Stacjonarności obiektu sterowania, tzn. stałości jego właściwości w czasie.
3. Uwzględnienia stanu początkowego obiektu sterowania przy formułowaniu algorytmu sterowania.
4. Usunięcia wpływu zakłóceń na stan obiektu podczas jego sterowania lub uwzględniania zmian zakłóceń w algorytmie sterowania.

Wymaganie pierwsze oznacza, że model obiektu sterowania musi być przedstawiony w postaci relacji matematycznych wiążących współrzędne stanu obiektu sterowania ze zmiennymi sterującymi i ewentualnie zakłócanymi. Stąd model taki nazywa się **modelem matematycznym**. Zależnie od celu sterowania model matematyczny może być:

- **modelem statycznym**, określającym zależność pomiędzy współrzędnymi stanu obiektu sterowania a wielkościami sterującymi i zakłóceniami jedynie w stanie ustalonym, tj. po zakończeniu wszystkich przebiegów przejściowych;
- **modelem dynamicznym**, określającym wymienione zależności również dla stanu nieustalonego, tzn. umożliwiającym wyznaczenie przebiegów przejściowych.

Przykładem modelu statycznego może być zależność pomiędzy ustaloną prędkością kątową wrzeciona obrabiarki a:

- wartością napięcia twornika silnika obcowzbudnego prądu stałego napędzającego to wrzeciono;
- przełożeniem przekładni sprzęgającej silnik z wrzecionem;
- momentem obciążenia wrzeciona.

Przykładem modelu dynamicznego może być równanie różniczkowe wiążące zmienne w czasie położenie suportu obrabiarki z przebiegami napięć sterujących silniki napędzające suport.

Stacjonarność obiektu sterowania oznacza, że w odpowiedzi na jednakowe przebiegi sterujących wielkości wejściowych i zakłóceń, przy jednakowych stanach początkowych, otrzymuje się jednakowe przebiegi czasowe współrzędnych stanu niezależnie od momentu czasu, w którym rozpoczęto sterowanie.

Przykładem obiektu niestacjonarnego może być np. obrabiarka, w której wspomniane wcześniej modele ulegają zmianom w czasie w wyniku zmian przełożenia przekładni sprzęgającej silnik z wrzecionem.

Wymaganie trzecie wynika stąd, że przyszłe stany obiektu zależą od stanu początkowego rozpoczynającego się w chwili początkowej przebiegu wielkości wejściowych sterujących. Na przykład głębokość wywierconego otworu zależy od stanu początkowego przedmiotu (tj. jego początkowego położenia), stanu początkowego narzędzia (tj. jego początkowego położenia) oraz przebiegu czasowego przesunięcia wiertła w czasie wiercenia. Uwzględnienie stanu obiektu przy formułowaniu algorytmu sterowania w torze otwartym może być realizowane dwojako:

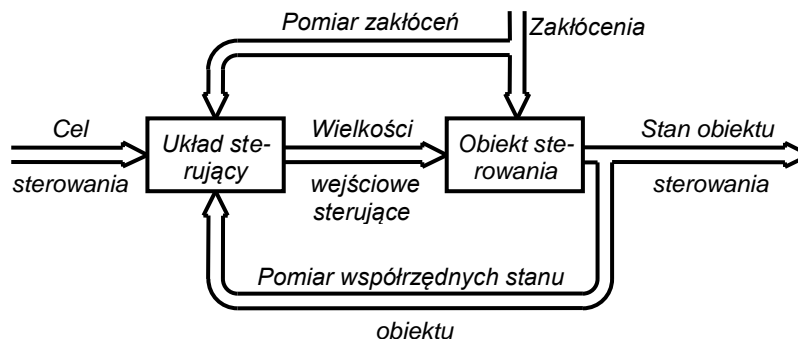
- przez zapewnienie stałego i zawsze takiego samego stanu początkowego przy kolejnych sterowaniach i jednorazowe uwzględnienie tego stanu przy konstrukcji algorytmu;
- przez każdorazowe uwzględnienie w algorytmie sterowania zmieniającego się stanu początkowego, traktowanego jako parametr algorytmu.

Wymaganie czwarte wynika stąd, że zmiana stanu obiektu podczas sterowania zależy nie tylko od przebiegu wielkości wejściowych sterujących, lecz również od przebiegu wielkości wejściowych zakłócających obiektu. Usunięcie wpływu zakłóceń na stan obiektu podczas sterowania polega np. na zapobieganiu zmianom zakłóceń podczas sterowania, co w omawianym przykładzie wymaga m.in. zabezpieczenia się przed niepożądanym przesunięciem obrabianego przedmiotu w trakcie obróbki.

Uwzględnienie zmian zakłóceń w algorytmie sterowania polega na takim uzależnieniu wielkości sterującej od zmian zakłóceń, by kompensować ich wpływ na cel sterowania.

2.4.2. Właściwości sterowania ze sprzężeniem zwrotnym

Na rys.2.6 pokazano schemat blokowy systemu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. W zależności od rodzaju sprzężenia zwrotnego można wyróżnić:



Rys.2.6. Schemat blokowy sterowania ze sprzężeniem zwrotnym

- systemy sterowane ze **sprzężeniem zwrotnym sporadycznym**, pojawiającym się wyłącznie w chwilach osiągnięcia określonych wartości i wybranych współrzędnych stanu;
- systemy sterowania ze **sprzężeniem zwrotnym ciągłym lub periodycznym**.

Przykładem pierwszych systemów może być system sterowania szlifierką ze sprzężeniem od wyłączników drogowych, które po osiągnięciu pozycji krańcowej przez szlifowany przedmiot powodują odwrócenie (rewersję) kierunku wirowania silnika wprawiającego w ruch szlifowany przedmiot. Systemy sterowania ze sprzężeniem zwrotnym sporadycznym są stosowane do realizacji stosunkowo prostych celów sterowania, np. **powtarzania określonej sekwencji zmian stanów obiektu sterowania sekwencyjnego**. Stąd systemy te nazywa się **systemami sterowania sekwencyjnego**. Systemy sterowania sekwencyjnego przez większą część swojej pracy są zasadniczo systemami sterowania w torze otwartym. Sprzężenia zwrotne pojawiają się jedynie w chwilach osiągnięcia wyróżnionych stanów, lecz właśnie dzięki temu w porównaniu z „czystym sterowaniem w torze otwartym:

- upraszcza się algorytm sterowania, np. odpada konieczność obliczania czasu przesuwu w jedną stronę do wyznaczenia momentu rewersji silnika;
- sterowanie obróbką nie wymaga tych zależności z modelu obiektu, które wiążą np. przesunięcie szlifowanego przedmiotu z prędkością kątową silnika przesuwającego przedmiot i czasem trwania przesunięcia.

Jedynymi modelami matematycznymi potrzebnymi do realizacji sterowania sekwencyjnego są modele logiczne, wiążące wyróżnione stany obiektu sterowania z pojawieniem się sygnałów sprzężeń zwrotnych. Dla omawianego przykładu model logiczny zawiera np. zdanie:

„Jeżeli zadziała wyłącznik drogowy (krańcowy) L, to przedmiot osiągnął skrajnie lewe położenie”.

Stąd również algorytm sterowania zawiera wyłącznie działania logiczne, typu:

„Jeżeli zadziała wyłącznik drogowy, to należy zmienić kierunek wirowania silnika z lewego na prawy”.

Algorytmy tego typu nazywa się **algorytmami sterowania logicznego**. Są one szczególnie łatwo realizowane, np. w technice przekaźnikowo - stykowych układów przełączających, w technice półprzewodnikowych układów przełączających lub w technice mikroprocesorowej.

Systemy sterowania ze sprzężeniami zwrotnymi, ciągłymi i periodycznymi, są najczęściej stosowane do celów regulacji automatycznej wybranych, technologicznie istotnych współrzędnych stanu obiektu. Celem regulacji może być:

- **stabilizacja** wymienionej współrzędnej stanu na określonej, stałej (tj. niezmiennej w czasie) wartości zwanej wartością zadaną, pomimo zmian zakłóceń oddziałujących na tę współrzędną stanu;
- **regulacja nadążna** wymienionej współrzędnej stanu, tj. zmiana jej wartości w taki sposób, by była równa lub bliska zmieniającej się wielkości zadanej.

Przykładem stabilizacji może być układ regulacji automatycznej prędkości kątowej silnika obcowzbudnego prądu stałego utrzymujący jej stałość, niezależnie od zmian momentu obciążenia silnika. Przykładem regulacji nadążnej może być układ regulacji zmieniający kąt obrotu wału takiego silnika proporcjonalnie do wartości wielkości zadanej wyznaczonej przez algorytm sterowania położenia suportu napędzanego tym silnikiem

Podstawową cechą regulacji jest ujemny znak sprzężenia zwrotnego od wymienionej współrzędnej stanu.

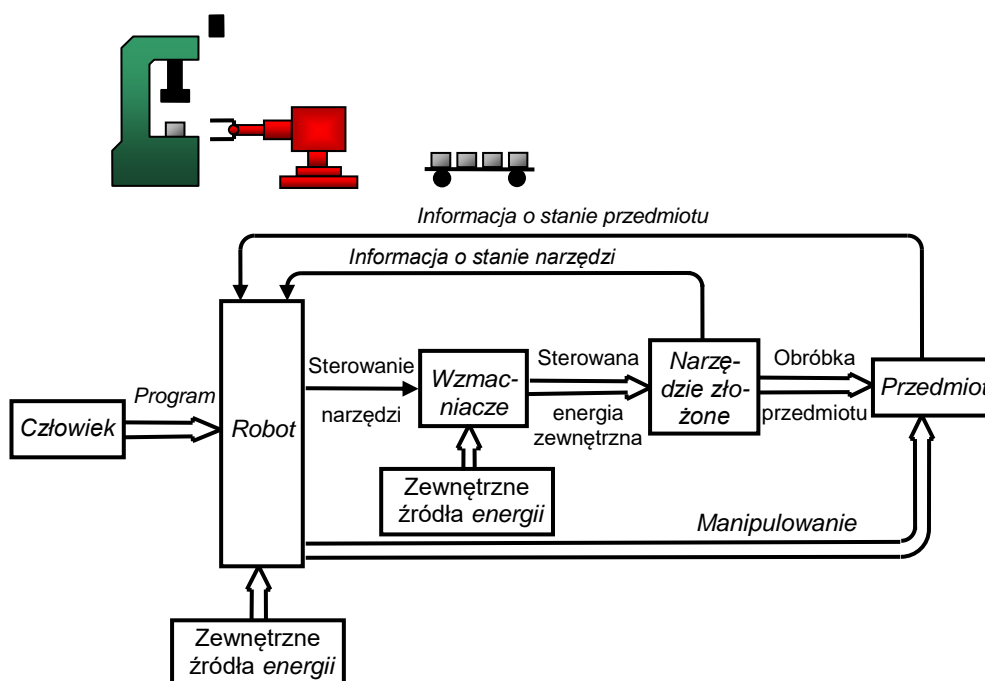
Ujemnym sprzężeniem zwrotnym od określonej współrzędnej stanu obiektu nazywa się takie oddziaływanie na wielkość wejściową sterującą tego obiektu w zależności od tej współrzędnej stanu, które przeciwdziała wszystkim odchyłkom tej współrzędnej stanu od jej wartości zadanej. Współrzędną stanu obiektu, od której realizowane jest ujemne sprzężenie zwrotne, nazywa się **wielkością regulowaną** obiektu.

2.5. Praca z urządzeniami obsługiwanymi przez roboty

Kolejnym etapem rozwoju pracy jest etap pracy z narzędziami złożonymi, sterowanymi i obsługiwanymi przez roboty, zaprogramowane przez człowieka (rys.2.7).

Roboty są narzędziami sterowanymi automatycznie dającymi się zaprogramować do wykonania dużej liczby różnorodnych sekwencji precyzyjnych czynności manipulacyjnych, jak np. uchwycenie przedmiotu, przemieszczenie przedmiotu (przeniesienie, obrócenie) pozostawienie przedmiotu w określonej pozycji w określonym miejscu (zakładanie, wkładanie, nakładanie). Sekwencje wymienionych czynności mogą być uzależnione od stanu obsługiwanego narzędzia oraz manipulowanego przedmiotu i mogą z kolei sterować obsługiwanym narzędziem.

Istotną cechą robotów jest ich **programowalność** tzn. możliwość zmiany sekwencji czynności manipulacyjnych przez zmiany programu przechowywanego w pamięci robota. Właściwości tej nie mają znacznie starsze od robotów mechaniczne elementy manipulujące, realizujące tylko taką sekwencję czynności manipulacyjnych dla wykonania, której zostały zaprojektowane.



Rys.2.7. Praca z narzędziami złożonymi, mającymi zewnętrzne źródła energii, sterowanymi i obsługiwanymi przez roboty, zaprogramowane przez człowieka

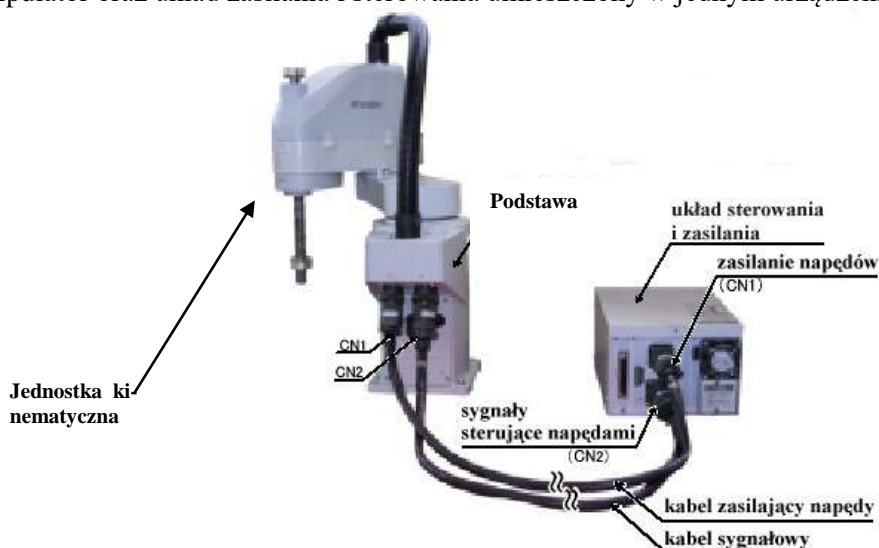
Elementy wykonawcze robotów, przeznaczone do wykonania czynności manipulacyjnych, noszą nazwę **manipulatorów**. Manipulatory są sterowane przez układ sterowania robota w zależności od realizowanego programu, współrzędnych stanu manipulatora, współrzędnych stanu narzędzia oraz współrzędnych stanu obiektu.

3. ELEMENTY SKŁADOWE I BUDOWA ROBOTÓW

3.1. Podstawowe układy robotów

Roboty przemysłowe składa się z następujących trzech podstawowych układów: zasilania, sterowania i ruchu.

W obecnie budowanych robotach układy zasilania, sterownia oraz jednostka kinematyczna znajdują się w osobnych urządzeniach. Często jednak można spotkać układy zasilania i sterowania umieszczone w jednym urządzeniu. Obserwując postęp w dziedzinie robotyki można stwierdzić, iż układy sterowania i zasilania podlegają miniaturyzacji. Na *rys.3.1* przedstawiono elementy składowe robota, czyli manipulator oraz układ zasilania i sterowania umieszczony w jednym urządzeniu.



Rys.3.1. Elementy składowe robota

Przedstawione podstawowe układy robotów przemysłowych są nierozdzielnie związane z pojęciem robota. Naturalnie istnieje możliwość zastosowania innych układów, których zadaniem może być przekazywanie dodatkowych informacji o otoczeniu robota do układu sterowania np. układy wizji maszynowej.

3.1.1. Układ zasilania

Układ zasilania w przypadku stosowania różnych napędów zawiera różne elementy. Układ zasilania w przypadku stosowania jako jednostek napędowych serwonapędów elektrycznych zawiera oprócz typowego sprzętu elektrycznego:

- układy tyrystorowe oraz układy prostownikowe do zasilania silników prądu stałego,
- przemienniki częstotliwości i napięcia do zasilania silników prądu przemiennego.

Układ zasilania w przypadku stosowania jako jednostek napędowych serwonapędów pneumatycznych zawiera oprócz sprzętu elektrycznego służącego do zasilania elementów elektrycznych układu także sprężarkę.

Układ zasilania w przypadku stosowania jako jednostek napędowych serwonapędów hydraulicznych zawiera oprócz sprzętu elektrycznego służącego do zasilania elementów elektrycznych układu typowy sprzęt związany z napędami hydraulicznymi, czyli pompę, zbiornik oraz układ chłodzenia/ogrzewania płynu roboczego.

3.1.2. Układ sterowania

Jednostka sterownicza w przypadku stosowania komputerowego sterowania robota zawiera główny pulpit sterowniczy maszyny ze wskaźnikami oraz przyciskami do ręcznego sterowania i wprowadzania informacji. W obecnie produkowanych robotach przemysłowych nieodłącznym elementem układu sterowania jest ręczny panel sterujący. Za pomocą takiego panelu można ręcznie sterować robotem, pisać program sterujący, kompilować, uruchomić, zatrzymać programy. Na rys.3.2 przedstawiono układ sterowania i zasilania robota wraz z ręcznym panelem sterującym.

Innym elementem dodatkowym układu sterowania jest komputer, który może współpracować z tym układem za pomocą odpowiednich aplikacji. Takie aplikacje umożliwiają pełną komunikację z robotem a ponadto są wygodniejsze do tworzenia programów sterujących.



Rys.3.2. Układ sterowania wraz z ręcznym panelem sterowania

3.1.3. Układ ruchu

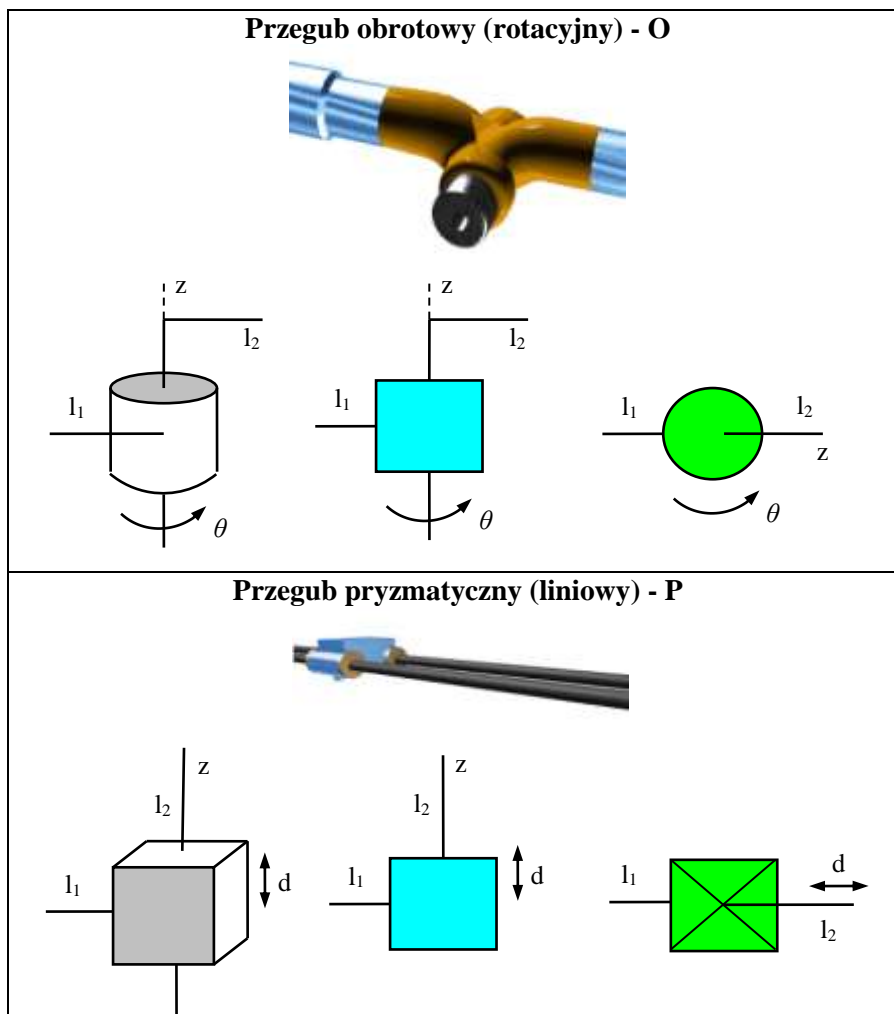
Jednostkę kinematyczną manipulatora tworzy mechanizm kinematyczny wraz z dołączonymi napędami. Współczesne manipulatory zbudowane są w postaci szeregowo lub szeregowo-równoległego układu połączonych ruchowo członów kinematycznych, czyli tzw. łańcucha kinematycznego.

Elementy kinematyczne tworzące parę kinematyczną z dołączonym napędem pozwalają na realizację ruchów względnych elementów pary kinematycznej, two-

rzą zespół ruchu. We współcześnie konstruowanych maszynach manipulacyjnych znaczenie techniczne mają wyłącznie połączenia członów V klasy, a więc pary o wzajemnym ruchu postępowym lub obrotowym. W przyszłości być może znajdą zastosowanie w budowie jednostki kinematycznej pary pozostałych klas szczególnie IV i III jednak obecnie trudności konstrukcyjne powodują, że nie znajdują one zastosowania poza robotami laboratoryjnymi.

Wspomniane pary kinematyczne klasy V to przeguby obrotowe służą do obrotu jednego członu względem drugiego, oraz przeguby pryzmatyczne umożliwiające ruch postępowy pomiędzy członami.

Do dalszych rozważań przyjęto następujące oznaczenia (**O**) dla przegubów obrotowych i (**P**) dla przegubów pryzmatycznych (rys.3.3).



Rys.3.3. Przeguby klasy V oraz ich symboliczna reprezentacja

Kombinacje przedstawionych przegubów tworzą odpowiednie konfiguracje kinematyczne manipulatorów i robotów.

3.2. Parametry opisujące manipulatory i roboty

Manipulatory przemysłowe są zbudowane z członów połączonych przegubami w otwarty łańcuch kinematyczny. Przeguby manipulatora mogą być napędzane elektrycznie, hydraulicznie, lub pneumatycznie. Liczba przegubów determinuje liczbę stopni swobody manipulatora. Zwykle manipulator powinien mieć, co najmniej sześć stopni swobody: trzy do pozycjonowania i trzy do orientowania. Przy liczbie stopni swobody mniejszej sześć manipulator nie może osiągnąć każdego punktu w przestrzeni z zadaną orientacją. Niektóre zadania, takie jak sięganie wokół lub za przeszkodę, wymagają więcej niż sześciu stopni swobody. Wraz ze wzrostem liczby stopni swobody manipulatora gwałtownie rośnie stopień trudności jego sterowania. Manipulator mający więcej niż sześć stopni swobody jest nazywany **manipulatorem kinematycznie redundantnym**.

Manipulator robota powinien być rozpatrywany jako coś więcej niż tylko zestaw połączeń mechanicznych. Ramie mechaniczne jest jednym ze składników całego systemu robota. W skład tego systemu wchodzi takie elementy jak:

- ramię
- zewnętrzne źródło zasilania
- oprzyrządowanie końca ramienia
- wewnętrzne i zewnętrzne czujniki
- serwonapędy
- interfejs do komputera i komputer sterujący

Również oprogramowanie powinno być włączone jako integralna część całego systemu, o ile sposób, w jaki robot jest programowany i sterowany, może mieć istotny wpływ na możliwości funkcjonalne i wynikający z tego zakres zastosowań.

Liczba stopni swobody jest to liczba zmiennych położenia, jaką należy podać w celu jednoznacznego określenia układu w przestrzeni. W celu wyznaczenia liczby stopni swobody łańcucha kinematycznego korzysta się ze wzoru:

$$w = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (3.1)$$

gdzie:

w – liczba stopni swobody,

n – liczba członów ruchomych,

p_i – liczba połączeń par kinematycznych o i -tej klasie,

i – numer klasy odpowiadający liczbie więzów nałożonych przez połączenie między dwoma członami traktowanymi jako ciała sztywne o sześciu stopniach swobody

Ponieważ w przypadku łańcuchów otwartych liczba członów ruchomych jest równa liczbie par kinematycznych, więc zależność (3.1) przyjmuje postać

$$w = 6 \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n i p_i = p_5 + 2p_4 + 3p_3 + 4p_2 + 5p_1 \quad (3.2)$$

co oznacza, że ruchliwość łańcucha otwartego równa się sumie liczb stopni swobody jego połączeń – par kinematycznych.

Ruchliwość r – liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego mechanizmu z unieruchomionym członem – podstawą

$$r = w - 6 = 6(n - 1) - \sum_{i=1}^n i p_i \quad (3.3)$$

Parametr ten określa liczbę więzów, jaką należałoby nałożyć na mechanizm, aby go całkowicie unieruchomić.

Manewrowość m – liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego mechanizmu z unieruchomionymi: podstawą i ostatnim w łańcuchu członem kinematycznym

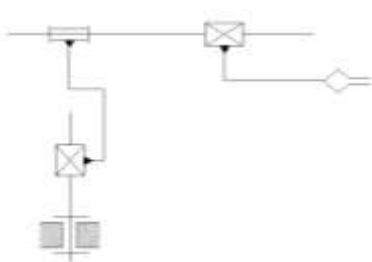
$$m = r - 6 = 6(n - 2) \sum_{i=1}^5 i p_i \quad (3.4)$$

Parametr ten określa liczbę więzów, jaką należałoby nałożyć na mechanizm, aby go całkowicie unieruchomić z dodatkowym unieruchomieniem jeszcze ostatniego wolnego członu, a więc określa swobodę ruchu mechanizmu, gdy np. chwytak lub narzędzie jednostki kinematycznej zajmuje ściśle określone położenie.

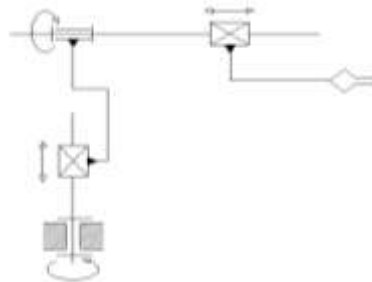
Na podstawie zależności (3.1) wyznaczono liczbę stopni swobody dla kilku prostych manipulatorów.

Przykład 3.1

Dla przedstawionego na rys.3.4 manipulatora z czterema parami kinematycznymi. Wyznaczyć liczbę stopni swobody oraz podać ilość napędów, jaką trzeba zastosować, aby manipulator mógł spełniać swoje zadanie.



Rys.3.4.



Rys.3.5.

Rozwiązanie:

Na podstawie rys.3.4 określono liczbę członów ruchomych manipulatora, która wynosi $n=4$. Następnie określono liczbę połączeń odpowiedniego rodzaju, w przypadku analizowanego manipulatora występują wyłącznie pary kinematyczne klasy V, czyli $p_5=4$ (2 przeguby obrotowe i 2 przeguby pryzmatyczne).

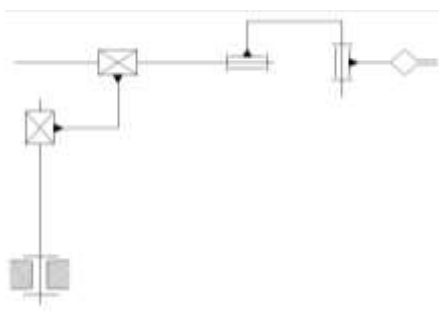
Wykorzystując równanie (3.1) wyznaczono liczbę stopni swobody w równą:

$$w = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 4 = 4$$

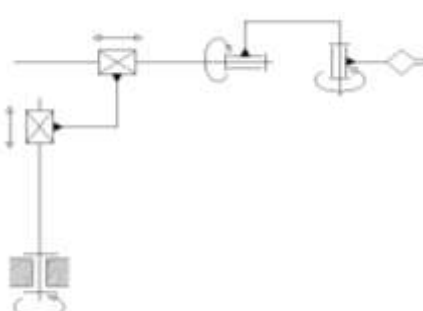
Aby manipulator posiadał cztery stopnie swobody należy zastosować 4 napędy w sposób przedstawiony na rys.3.5.

Przykład 3.2

Manipulator zilustrowany na rys.3.6 posiada pięć par kinematycznych. Wyznaczyć liczbę stopni swobody oraz podać ilość napędów, jaką trzeba zastosować, aby manipulator mógł spełniać swoje zadanie.



Rys.3.6.



Rys.3.7.

Rozwiązanie:

Podobnie jak w przykładzie 3.1 wyznaczono $n=5$ natomiast $p_5=5$ tak, więc liczba stopni swobody wynosi:

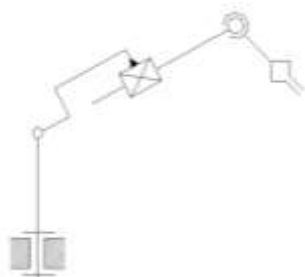
$$w = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 5 = 5$$

Należy zastosować 5 napędów, tak jak przedstawiono to na rys.3.7, aby manipulator spełnił określone zadania.

Jak łatwo można zauważyć liczba stopni swobody otwartego łańcucha kinematycznego jest równa liczbie par kinematycznych klasy piątej obrotowych i przesuwnych.

Przykład 3.3

Dla manipulatora zilustrowanego na rys.3.8 posiadającego cztery pary kinematyczne. Wyznaczyć liczbę stopni swobody oraz podać ilość napędów, jaką trzeba zastosować, aby manipulator mógł spełniać swoje zadanie.



Rys.3.8.



Rys.3.9.

Rozwiązanie:

Istnieje kilka sposobów rozwiązania tego zadania, można zastąpić przegub kulowy na trzy przeguby obrotowe z zerowymi przemieszczeniami lub podstawić do wzoru (3.1) odpowiednią klasę pary kinematycznej. Tak, więc dla schematu przedstawionego na rys.3.8 można zapisać $n=4$, $p_3=1$, $p_5=3$. Wykorzystując wzór (3.1) otrzymano:

$$w = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 1 = 6$$

Jak wynika z obliczeń liczby stopni swobody należy zastosować 6 napędów, które należy przyłożyć do poszczególnych członów tak jak przedstawiono to na rys.3.9.

Elementy kinematyczne tworzące parę kinematyczną z dołączonym napędem pozwalającym na realizację ruchów względnych elementów pary kinematycznej, tworzą zespół ruchu. We współcześnie konstruowanych maszynach manipulacyjnych znaczenie techniczne mają najczęściej połączenia członów V klasy a więc pary o wzajemnym ruchu postępowym lub obrotowym. W mniejszym stopniu znajdują zastosowanie w budowie jednostki kinematycznej pary pozostałych klas szczególnie IV i III jednak trudności konstrukcyjne powodują, że nie znajdują one zastosowania na szeroką skalę w przemyśle.

Jednostkę kinematyczną manipulatora tworzy mechanizm kinematyczny wraz z dołączonymi napędami.

Oprócz parametrów syntetycznych, jakimi są liczby ruchliwości i manewrowości mechanizm jednostki kinematycznej manipulatora opisuje się przez podanie jego ogólnych właściwości geometrycznych, czyli tak zwanej struktury kinematycznej. Pod pojęciem struktury kinematycznej łańcucha lub mechanizmu rozumie się określenie schematu kinematycznego w postaci szkicu, wykorzystujących oznaczenia członów i połączeń par kinematycznych.

Struktura jednostki kinematycznej wraz z opisem wymiarowym schematu kinematycznego i zakresem przemieszczeń zespołów ruchu w sposób jednoznaczny określają przestrzeń ruchów mechanizmu, a wynikowo przestrzeń ruchów chwytaka lub narzędzia. Ze względów użytkowych, przestrzeń ta jest opisana, niezależnie od zwymiarowanego szkicu, także przez podanie objętości. W przestrzeni roboczej wyróżnia się następujące obszary:

- **główną przestrzeń roboczą** – w obrębie, której przemieszcza się konstrukcyjne zakończenie ostatniego, wolnego, ale nierozdzielnie związanego z mechanizmem jednostki kinematycznej członu, z reguły sprzęgu chwytaka lub narzędzia;
- **przestrzeń kolizyjną** – w obrębie, której zawierają się wszystkie elementy konstrukcyjne i przemieszczają się wszystkie zespoły ruchu – człony mechanizmu jednostki kinematycznej;
- **przestrzeń ruchów jałowych** – przestrzeń kolizyjną z wyłączeniem głównej przestrzeni roboczej;
- **strefę zagrożenia** – przestrzeń zabronioną przepisami lub normami BHP dla obsługi w czasie pracy jednostki kinematycznej.

Przestrzenie robocze i kolizyjne dzieli się na: **mechaniczne** i **sterownicze**. Przestrzenie mechaniczne wynikają z konstrukcyjnych właściwości jednostki kinematycznej z korekcjami pochodzącymi np.: od sumowania luzów w połączeniach, statycznymi i dynamicznymi odkształceniami sprężystymi itp. Przestrzenie te są z reguły większe od przestrzeni nominalnych określonych na podstawie geometrii mechanizmu. Przestrzenie sterownicze uwzględniają ograniczenia sterownicze wynikające z właściwości układów pomiarowych przemieszczeń, ograniczenia wynikające z zakresu przetwarzania oraz właściwości samego układu sterownia np. ograniczenia wynikające z zakresów pracy serworegulatorów. Przestrzenie te są z reguły mniejsze od przestrzeni nominalnej.

Stosunek objętości przestrzeni roboczej i jałowej lub kolizyjnej **określa poprawność przyjętego rozwiązania struktury jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej**, rozwiązanie jest tym lepsze im większą część przestrzeni kolizyjnej zajmuje przestrzeń robocza. Jako parametr zaproponowano współczynniki określone wyrażeniami:

$$B = \frac{V_r}{V_j} = \frac{V_k}{V_r} \quad (3.5)$$

gdzie:

V_r , V_j , V_k – oznaczają odpowiednio objętość przestrzeni roboczej, jałowej, oraz kolizyjnej.

3.2.1. Dokładność i powtarzalność

Innymi istotnymi parametrami opisującymi manipulatory i roboty są dokładność i powtarzalność.

Dokładność manipulatora jest miarą określającą, jak blisko manipulator może dojść do danego punktu przestrzeni roboczej.

Powtarzalność zaś jest miarą określającą, jak blisko manipulator może ponownie dojść do uprzednio osiągniętego punktu. Obecne manipulatory mają bardzo dobrą powtarzalność, ale niezbyt dobrą dokładność. Podstawowa metoda pomiaru położenia polega na zastosowaniu enkoderów pozycji umieszczonych w każdym przegubie – na wale silnika napędzającym ten przegub lub bezpośrednio w samym

przegubie. Charakterystyczne jest, że nie stosuje się bezpośredniego pomiaru pozycji narzędzia ani jego orientacji. Najczęściej pozycję narzędzia oblicza się na podstawie pomiaru kątów lub przesunięć w przegubach, zakładając geometrię manipulatora i jego sztywność.

Na dokładność wpływają, więc błędy obliczeniowe, dokładność obróbki elementów konstrukcyjnych manipulatora, efekty elastyczne, takie jak ugięcia członów pod wpływem grawitacji lub innych obciążeń, luzy w przekładniach oraz wiele innych efektów statycznych i dynamicznych. Właśnie z tych powodów roboty projektowane są z dużą sztywnością. Bez dużej sztywności dokładność mogłaby być poprawiana jedynie przez zastosowanie bezpośrednich czujników pozycji końcówki roboczej, np. czujników wizyjnych.

Podczas uczenia robota, np., gdy za pomocą panelu programowania jest wprowadzana kolejna pozycja, powyższe efekty są uwzględniane i układ sterowania zapamiętuje odpowiednie wartości wskazań enkoderów, niezbędne do powrotu manipulatora do tej pozycji. Na powtarzalność wpływa, więc w pierwszym rzędzie rozdzielczość układu sterowania.

Przez rozdzielczość układu sterowania rozumiemy najmniejszy przyrost ruchu, który układ sterowania może rozpoznać. Rozdzielczość jest obliczona jako całkowita droga, którą przebywa końcówka danego członu, podzielona przez $2n$, gdzie n jest liczbą bitów, określającą rozdzielczość enkodera. Osie liniowe, a więc przeguby pryzmatyczne, charakteryzują się przeważnie lepszą rozdzielczością niż osie obrotowe, ponieważ linia prosta poprowadzona między dwiema pozycjami końcówki członu liniowego jest krótsza niż odpowiadający jej łuk zakreślany przez końcówkę członu obrotowego. Dodatkowo, w przypadku osi obrotowych występują silniejsze wzajemne sprzężenia kinematyczne i dynamiczne między członami, co prowadzi do kumulowania błędów oraz do coraz większych problemów ze sterowaniem. W tej sytuacji warto zastanowić się nad zaletami osi obrotowych. Przede wszystkim należy tu wymienić większą zwrotność ruchu oraz zwartość konstrukcji osi obrotowych.

4. KLASYFIKACJA I SYSTEMATYZACJA ROBOTÓW

Większość maszyn wytwarzanych od połowy dwudziestego wieku należała do maszyn: roboczych, silnikowych, technologicznych, transportowych. Pojawienie się maszyn cybernetycznych spowodowało konieczność rozszerzenia klasycznej definicji maszyny zdefiniowanej jeszcze przez F. Reuleauxa w 1875 r.

W 1963 r. I. Artbolewski zaproponował definicję: **maszyna to** urządzenie przeznaczone do całkowitego lub częściowego zastępowania funkcji energetycznych, fizjologicznych, fizjologicznych i intelektualnych człowieka. Tak określoną maszynę będziemy nazywali cybernetyczną.

Manipulator to urządzenie techniczne przeznaczone do realizacji niektórych funkcji kończyny górnej człowieka. Rozróżniamy dwa rodzaje funkcji: manipulacyjne i wyciągowe. Współczesne manipulatory składają się z pojedynczego łańcucha kinematycznego otwartego o pięciu do dziewięciu stopniach swobody lub zdwojonego łańcucha, zespołu siłowników (napędu), układu sterowania, czujników i układu zasilania.

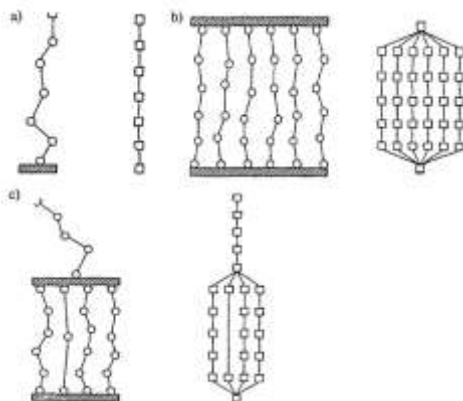
4.1. Systematyzacja robotów i manipulatorów

Można spotkać różne podziały manipulatorów i robotów. Pierwszy z nich oparty jest na kryterium budowy strukturalnej.

4.1.1. Klasyfikacja manipulatorów

Łańcuchy kinematyczne można podzielić na trzy grupy (rys.4.1):

1. Szeregowy manipulator prosty, w którym nie występują gałęzie (rys. 4.1a),
2. Równoległy manipulator- łańcuch kinematyczny złożony ze zbioru równoległych gałęzi (rys. 4.1b),
3. Hybrydowy manipulator, który stanowi kombinację szeregowo- równoległą (rys.4.1c).



Rys.4.1. Rodzaje łańcuchów kinematycznych robotów

Podział manipulatorów oparty na kryterium rodzaju sterowania:

1. Manipulatory biotechniczne:
 - z ręcznym sterowaniem (niekopiujący),
 - kopiujący z jednostronnym lub dwustronnym działaniem,
 - półautomatyczne (rękojeść i sterownik lub wyspecjalizowany komputer).
2. Manipulatory automatyczne:
 - programowalne,
 - adaptacyjne (z sensorami i wizją),
 - intelektualne (z elementami inteligencji maszynowej),
 - roboty manipulacyjne.
3. Manipulatory interakcyjne:
 - zautomatyzowane (ze zmiennym trybem pracy włączającym automatyczne sterowanie i biotechniczne wg zapisu pamięci),
 - z nadrzędnym sterowaniem (z automatyczną realizacją etapu i nadzorem operatora w torach połączenia),
 - dialogowe (wyższe formy współpracy z operatorem- głównie tekstowe).

Manipulatory antropomorficzne można podzielić na klasy wg następujących kryteriów:

1. Podobieństwa czynności manipulacyjno- wysięgnikowych:
 - częściowo podobny do oryginału w zakresie czynności manipulacyjnych,
 - niepodobny do oryginału, ale realizujący określone czynności manipulacyjne,
 - częściowo podobny do oryginału w zakresie czynności manipulacyjno- lokomocyjnych,
 - niepodobny do oryginału, ale umożliwiający realizację określonych czynności manipulacyjno – wysięgnikowych.
2. Podobieństwa w zakresie sterowania i regulacji ruchu układu manipulacyjno – wysięgnikowego:
 - manipulator kopiujący typu otwartego lub zamkniętego,
 - wielozadaniowy układ manipulacyjno-wysięgnikowy sterowany z komputera,
 - adaptacyjny manipulator z zaczątkami inteligencji maszynowej,
 - samodzielny manipulator z rozwiniętym układem inteligencji maszynowej.
3. Przeznaczenia manipulatora:
 - manipulatory technologiczne,
 - manipulatory transportowe,
 - manipulatory informacyjno-operacyjne.

4.1.2. Klasyfikacja robotów

Można spotkać różne klasyfikacje robotów w zależności od przyjętych kryteriów podziału. Przyjmując jako kryterium podziału np. **przeznaczenia**, rozróżnia się następujące klasy robotów:

- do badań naukowych,
- do celów szkoleniowych,

- do celów przemysłowych,
- do celów badawczych pod wodą, w przestrzeni kosmicznej i na powierzchni.

Według kryterium **stopnia specjalizacji** rozróżniamy roboty:

- wyspecjalizowane,
- specjalne,
- uniwersalne.

Według **rodzaju napędu** roboty można podzielić na klasy:


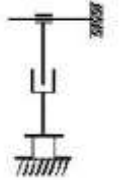
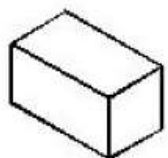

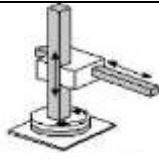
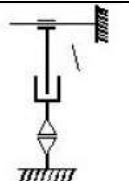


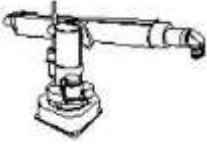




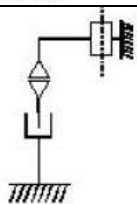
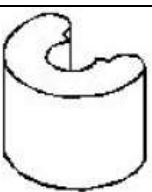


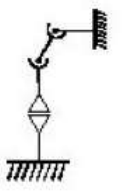



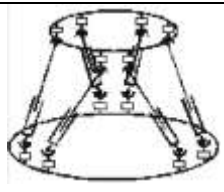


- z napędem pneumatycznym,
- z napędem hydraulicznym.
- z napędem elektrycznym,
- z napędem mieszanym.

Według kryterium **własności geometrycznych** wyróżniamy roboty:

- a) o różnej konfiguracji geometrycznej zależnej od wymiarów członów, zakresów liniowych i kątowych przemieszczeń, które determinują ruchy ramienia, stawu promieniowo-nadgarstkowego i chwytaka,
- b) pracujące w różnych układach współrzędnych (*tab. 4.1*):
 - kartezyjskim (trzy osie wzajemnie prostopadłe), chwytak przemieszcza się w trzech kierunkach, co zapewnia wysoką dokładność, ale ruch jest wolniejszy,
 - cylindrycznym (dwie osie i jeden kąt), ramię przemieszcza się w kierunkach poziomym i pionowym oraz wykonuje ruch obrotowy wokół osi pionowej,
 - sferycznym (jedna oś i dwa kąty), gdy ramię obraca się wokół punktu zamocowania i może się przemieszczać poniżej i powyżej punktu zamocowania,
 - typu SCARA (jedna oś i dwa kąty),
 - antropomorficznym (stawowym) - trzy kąty, ramię wykonuje ruchy zginania i odwodzenia, jak w stawie ramiennym człowieka, oraz zginania w stawie łokciowym; praca w tym układzie umożliwia osiągnięcie położenia niedostępnych przy pracy w innych układach;
 - złożonym (m osi, n kątów).

Otoczenie robota jest to przestrzeń, w której robot jest usytuowany. Dla robotów stacjonarnych otoczenie ogranicza się do przestrzeni roboczej. **Przestrzeń robocza** manipulatora jest całkowitym obszarem, do którego sięga jego końcówka robocza przy pełnych zakresach wszystkich możliwych ruchów manipulatora. Jest ona ograniczona przez geometrię manipulatora, jak też przez mechaniczne ograniczenia zakresów ruchów w poszczególnych przegubach. W przestrzeni roboczej często wyróżnia się przestrzeń roboczą osiągalną i przestrzeń roboczą pełnej sprawności. **Przestrzeń robocza osiągalna** jest całkowitym zbiorem punktów osiągalnych przez manipulator, podczas gdy **przestrzeń robocza pełnej sprawności** składa się z tych punktów, które manipulator może osiągnąć z wyznaczoną orientacją końcówki roboczej. Oczywiście przestrzeń robocza pełnej sprawności jest podzbiorem przestrzeni roboczej osiągalnej.

Tabela 4.1. Konfiguracje, oznaczenia, schematy i przestrzenie robocze robotów o różnych strukturach układów osi

Konfiguracja	Kinematyczna struktura	Przestrzeń robocza	Zdjęcie
 Kartezjańska			
 Cylindryczna			
 Sferyczna			
 SCARA			
 Stawowa			
 Złożona			

Według kryterium **własności kinematycznych** roboty można podzielić w zależności od:

- liczby stopni swobody,
- liczby odmian działania, związanych z przemieszczaniem i prędkością ruchu.

Według kryterium **własności dynamicznych** rozróżnia się roboty o różnych osiągnięciach, związanych z minimalizacją obciążeń dynamicznych oraz drgań.

Innym kryterium podziału może być dokładność położenia, orientacji oraz zapewnienia żądanej dokładności w określonych strefach przestrzeni roboczej. Rozróżnia się tutaj roboty należące do różnych klas superprecyzyjnych (poniżej 0,1mm), precyzyjnych (poniżej 1mm) i przeciętnych (od 1 do 5mm).

Według kryterium **mobilności** rozróżnia się roboty:

- stacjonarne,
- mobilne (naziemne, portalowe).

Według kryterium **sterowania** rozróżnia się roboty z prostym elektromechanicznym układem sterowania wyposażonym w ograniczniki ruchu i wyłączniki aż do wyszukanych komputerowych układów sterowania typu on-line. Stąd rozróżnia się cztery grupy robotów:

- ze stałym programem - robot realizuje kolejne operacje wg ustalonej z góry sekwencji lub z programem o zmiennej sekwencji, tzn. dopuszcza się zmianę kolejności operacji;
- z programem dyskretnym punkt do punktu PTP (ang. point-to-point) - playback robot wykorzystuje pamięć w celu realizacji zbioru operacji uprzednio wykonywanych ręcznie;
- ze sterowaniem ciągłym CP (ang. continuous path control) - robot jest zaprogramowany w układzie off-line lub on-line i wykorzystywany w czasie rzeczywistym; operator naucza robota przez prowadzenie końcówki po zadanej trajektorii;
- robot inteligentny - wykorzystuje układy sensoryczne (sensory dotyku, wizji, głosu) umożliwiające detekcję zmian warunków pracy oraz dostosowanie się przez wykorzystanie układów decyzyjno-adaptacyjnych.

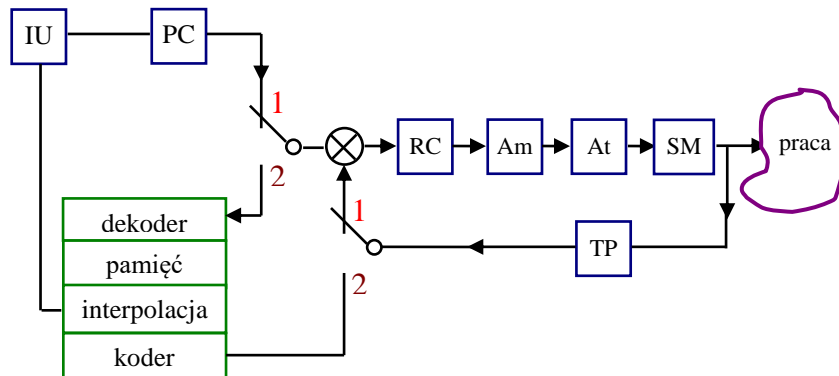
Spotyka się również inne podziały robotów, jak np.:

- roboty do prostych operacji (bez układu typu serwo),
- programowane roboty (ze sterowaniem typu serwo),
- roboty inteligentne (z układem sensorycznym - wizja, czucie, głos), które same modyfikują swoje funkcjonowanie.

Często spotyka się następujący podział robotów **ze względu na ich kolejne generacje:**

- roboty **I generacji** - roboty przemysłowe zaprogramowane na określoną sekwencję czynności *rys.4.2*.

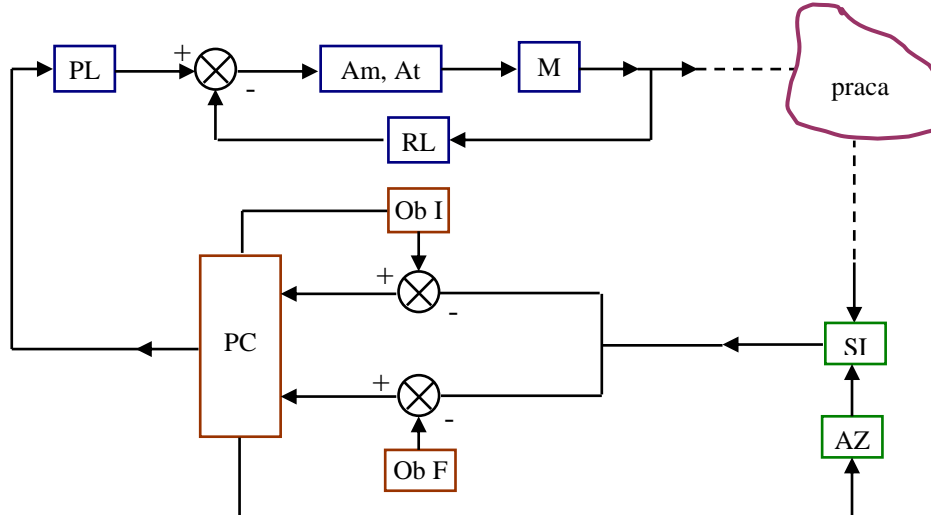
Pozycja 1 dwóch komutatorów odpowiada fazie nauczania programu, a pozycja 2 fazie jego odtwarzania. Instrukcję w fazie nauczania robot otrzymuje od człowieka – nauczyciela IU, następnie poprzez blok sterujący PC, układ korelacji RC, wzmacniacz Am, siłownik At, wykonawczy układ mechaniczny SM zostaje on zanotowany w pamięci.



Rys.4.2. Schemat blokowy (strukturalny) robota I generacji

Przekazywanie instrukcji do pamięci następuje poprzez przetworniki położenia TP ulokowane w torze sprzężenia zwrotnego, koder, interpolator i pamięć. Przy odtwarzaniu, kiedy komutatory zajmują pozycję 2, sygnały płyną poprzez dekoder i są porównywane z sygnałami z przetworników (enkoderów) położenia TP. Tor sprzężenia zwrotnego zamyka się w obrębie samego układu, co oznacza, że nie jest on przystosowany do rejestracji informacji zewnętrznej, tzn. informacji wynikającej ze współpracy robota z otoczeniem. Takie roboty, są używane do realizacji różnych czynności manipulacyjnych z przedmiotami.

- roboty **II generacji** - roboty wyposażone w zestaw czujników umożliwiający określoną współpracę z otoczeniem (ręka Ernesta, 1958 r.) rys.4.3.

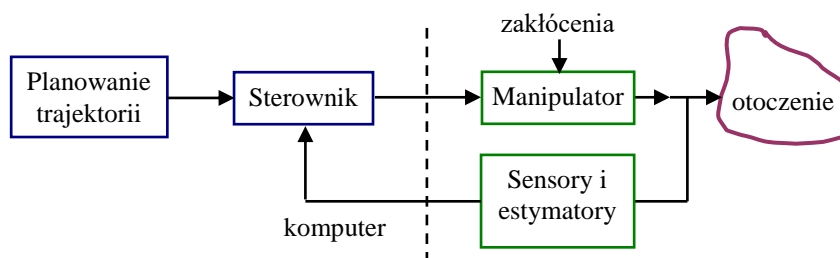


Rys.4.3. Schemat blokowy robota II generacji

Robot powinien rozpoznawać żądany obiekt nawet wówczas, gdy przemieszcza się z innymi obiektami, następnie rozpoznać ten obiekt bez względu na jego położenie

i kształt geometryczny. Takie roboty realizują te wymagania za pomocą zespołu czujników. Schemat blokowy robota II generacji przedstawiono na rys.4.3. W głównych blokach podano program pracy PL i program obliczeniowy PC. Program pracy jest przekazywany do manipulatorów M przez wzmacniacze Am i At. Korekta zachodzi w gałęzi RL. Informacje o obiekcie są przekazywane do układu badania otoczenia SIA (porównywanie z PC) i jednocześnie do dwóch układów, nazywanych obiektami: pośrednim Ob I i końcowym Ob. F, gdzie następuje ich porównanie i wnoszenie tej informacji do programu maszynowego.

- roboty **III generacji** - roboty typu ręka-oko (rozpoznawanie obiektów)
rys.4.4.



Rys.4.4. Schemat blokowy robota III generacji

Przykład schematu blokowego robota III generacji pokazano na rys.4.4. W tym układzie informacja o otoczeniu jest odbierana za pomocą sensorów wizyjnych oraz przekazywana do komputera, co umożliwia, przy znajomości modelu kinematyki i dynamiki manipulatora oraz kryterium sterowania, realizację zaplanowanego zadania, np. zadanej trajektorii.

Typowymi przykładami manipulatora informacyjno-operacyjnego są manipulatory przeznaczone do operowania pod wodą lub manipulatory wykorzystywane w kosmosie.

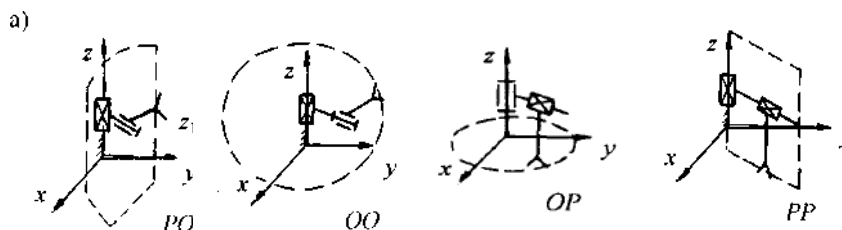
4.2. Odmiany łańcuchów kinematycznych

Rozważmy niektóre odmiany łańcuchów kinematycznych, złożonych wyłącznie z połączeń obrotowych (O) i postępowych (P). Z rachunku kombinatorycznego wynika, że liczbę odmian (wariacji) łańcuchów utworzonych z dwóch elementów, w tym przypadku O i P, można określić z zależności

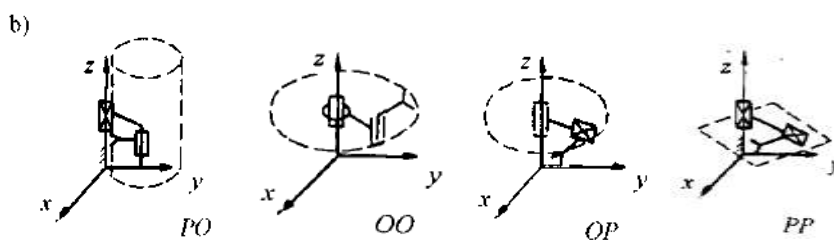
$$L_k = 2^k \tag{4.1}$$

gdzie: k - liczba członów lub ruchliwość struktury.

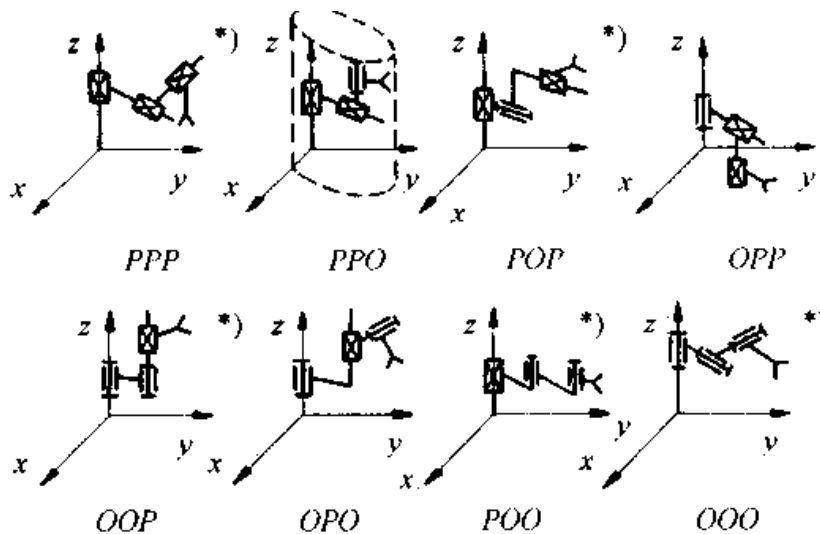
Dla k = 1 otrzymuje się połączenie obrotowe lub postępowe. Dla k = 2 otrzymuje się cztery możliwe odmiany pokazane na rysunkach, utworzone z połączeń obrotowych O i postępowych P, a mianowicie. PO, OO, OP i PP.



Zmieniając usytuowanie osi par (dopuszcza się zmianę usytuowania osi o kąt $\pi/2$) można uzyskać dodatkowe odmiany pokazane na rysunkach.

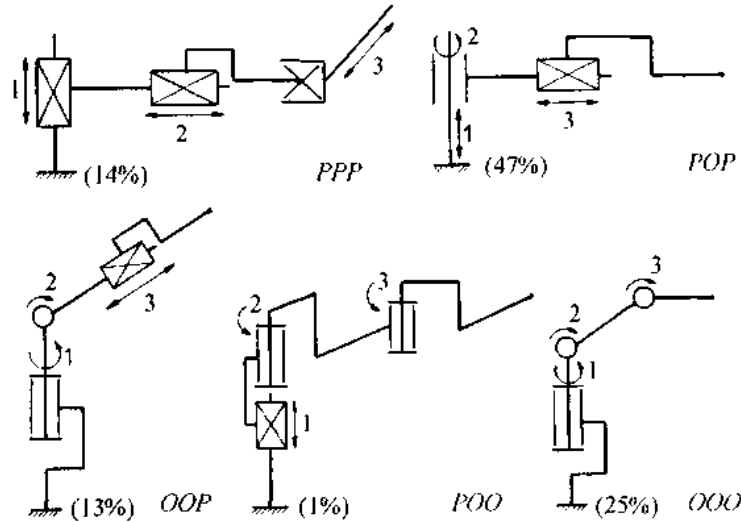


Dla $k = 3$ uzyskuje się osiem odmian od PPP do OOO.



Rys.4.5. Odmiany łańcuchów kinematycznych

Do najczęściej spotykanych rozwiązań należą odmiany, które pokazano na rys.4.6.

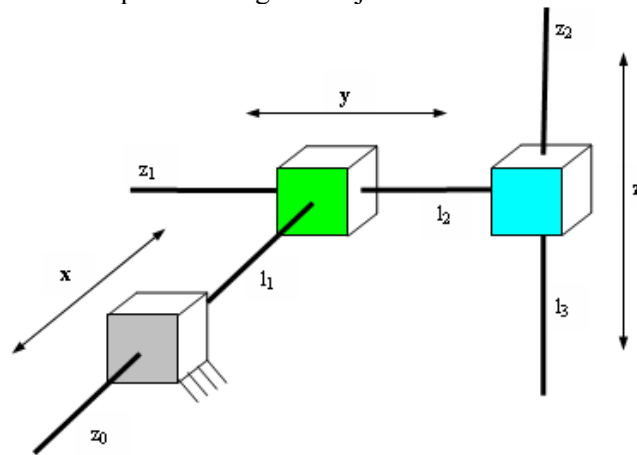


Rys.4.6. Najczęściej spotykane rodzaje łańcuchów kinematycznych

4.3. Klasyfikacja na podstawie własności geometrycznych

4.3.1. Konfiguracja kartezjańska (PPP)

Manipulator, którego trzy przeguby są pryzmatyczne (PPP) nazywamy manipulatorem kartezjańskim (rys.4.7). Dla manipulatora kartezjańskiego zmienne przegubowe są współrzędnymi kartezjańskimi końcówki roboczej względem podstawy. Opis kinematyki takiego manipulatora jest najprostszy z pośród przedstawionych tutaj konfiguracji. Konfiguracje kartezjańskie są wykorzystywane do montażu na blacie stołu oraz do transportu różnego rodzaju ładunków.



Rys.4.7. Konfiguracja manipulatora kartezjańskiego (PPP)

Przegląd robotów typu PPP

Roboty firmy „ADEPT” typu Smart są długometrażową sztywną konstrukcją. Zaprojektowane głównie do manipulowania małymi przedmiotami. Stosowane między innymi do produkcji, wytwarzania, montowania zespołów, podzespołów elektronicznych jak również w medycynie i laboratoriach automatyzacji. Jest to robot kompatybilny pracujący z różnymi systemami kontroli i sterowania. Produkowane są w 50 różnych typach.



Rys.4.8. Robot kartezjański firmy ADEPT typu Smart 1 i Smart 2

Cechy charakterystyczne: waga własna 25kg, udźwig ok. 5,5kg, długość 300 - 2000mm, szerokość 250 - 950mm, wysokość 210mm. Kąt rotacji narzędzia 360°. Błąd liniowy pozycjonowania ok. 0.03mm, kątowy ok. 0.03°

Roboty kartezjańskie firmy „Epson” są produkowane w dwóch wersjach standardowych typ XM3064 na 600 x 400mm i typ XM3106 ma 1000mm x 600mm, pracujące obwiedniowo.

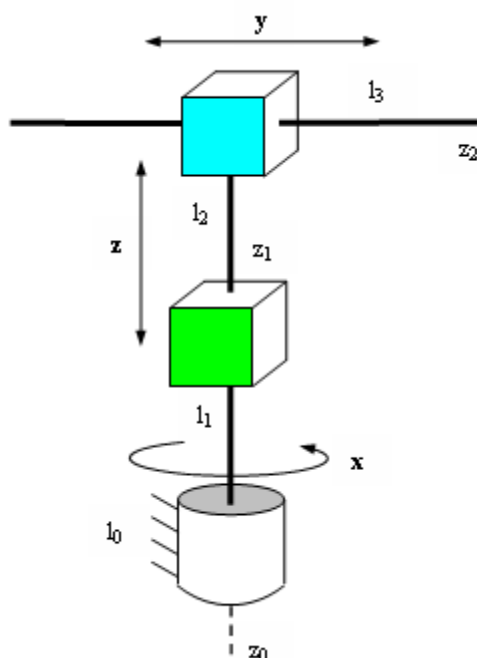
Z powodu na linearną naturę ich ruchów, są z natury bardziej dokładne niż roboty o ruchach rotacyjnych.

Cechy charakterystyczne: długość 200 - 1000mm, szerokość 300 - 800mm, wysokość 200mm. Kąt rotacji narzędzia 360°.



Rys.4.9. Robot kartezjański firmy Epson

4.3.2. Konfiguracja cylindryczna (OPP)



W literaturze anglojęzycznej roboty typu OPP określa się terminem - roboty cylindryczne, związane to jest z cylindrycznym układem współrzędnych opisujących ruch manipulatora oraz kształt jego przestrzeni roboczej podany w *tab.4.1.*

Pierwszy przegub (*rys.4.10*) jest obrotowy i wykonuje obrót wokół podstawy, podczas gdy przegub drugi i trzeci są pryzmatyczne. Jak sugeruje nazwa, zmienne przegubowe są zarazem współrzędnymi cylindrycznymi końcówki roboczej względem podstawy.

Rys.4.10. Konfiguracja manipulatora cylindrycznego (OPP)

Zalety robotów cylindrycznych:

- łatwość wizualizacji i obliczeń
- prostota programowania
- sztywna struktura, umożliwiająca przenoszenie ciężkich obiektów w całej przestrzeni roboczej
- dobry dostęp do otworów i luk

Wady robotów cylindrycznych:

- ograniczony poziom dostępu, tzn. obszar pracy znajduje się blisko podstawy robota
- napędy robota są odsłonięte, co naraża je na zabrudzenia i zalania

Przegląd robotów typu OPP

Robot RT3300 (*rys.4.11*) jest jednym z najnowocześniejszych robotów charakteryzujący się dużą prędkością działania i wysoką powtarzalnością. Producent gwarantuje powtarzalność $\pm 0,015\text{mm}$. Jego zaletą jest fakt, że wszystkie przewody i napędy pneumatyczne są zasłonięte, co zmniejsza zużycie i ochrania przed dostaniem się zanieczyszczeń.



Rys.4.11. Robot RT3300

Nowym produktem firmy Zymark jest robot Zymate XP (*rys.4.12*). W konfrontacji z jego poprzednikiem robotem Zymate II wykazuje on wyższość pod względem prędkości jak i przyspieszeń. Jak zapewnia firma, parametry te są trzykrotnie wyższe dzięki usztywnieniu osi pionowej robota. Mechanizm kiści stał się bardziej precyzyjny dzięki zmniejszeniu jego masy. Elementy elektroniki odpowiadające za sterowanie kiścią zostały przeniesione do podstawy. Poprzednia generacja robotów Zymate używała analogowego systemu servo. Robot XP używa cyfrowego kontrolera przez mikroprocesor wbudowany na stałe do podstawy. Ta nowa cyfrowa technologia mechanizmów servo gwarantuje bardzo wysoką dokładność pozycjonowania przy jednoczesnej dużej prędkości kiści.



Rys.4.12. Robot Zymate XP

Robot **R16** (*rys.4.13*) posiada system programowania RoboforthII, który jest bardziej wszechstronny od innych systemów konkurencyjnych.



Rys.4.13. Robot R16 – jego kilka zastosowań

Tabela 4.2. Parametry techniczne robota R16

Zakres ruchów	500mm
Przyspieszenie	2 - 3G
Powtarzalność pozycjonowania	$\pm 0.01\text{mm}$
Max udźwig	4kg
Waga	20kg
Napęd	AC Servo Motor
Zasilanie	AC 200 ^{+10%} _{-15%} V
Częstotliwość	50/60Hz
Przestrzeń robocza	r = 1136mm h = 300mm

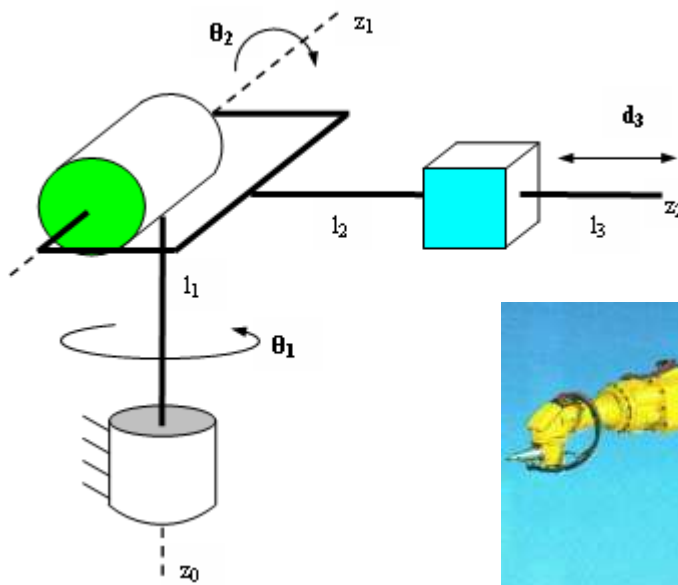
Wśród wielu cech na szczególną uwagę zasługuje fakt, że w systemie tym zastosowano system ciągłego monitorowania i śledzenia trajektorii wszystkich obiektów w przestrzeni roboczej manipulatora, dzięki czemu możemy uniknąć ewentualnych kolizji. Firma oferuje również dodatkowe wyposażenie np. czytniki kodów kreskowych, wirówki, wibratory, inkubatory, urządzenia metkujące. Zadbano również o „magazyn” czy też „bank” narzędzi, które mogą być w każdej chwili załączone.

czone do kiści i po zakończeniu pracy odłożone na właściwe miejsce, a liczba ta sięga nawet 96 narzędzi.

4.3.3. Konfiguracja manipulatorów typu (OOP)

Do manipulatorów typu OOP zalicza się konstrukcje o jednym liniowym i dwóch obrotowych zespołach ruchu regionalnego.

W manipulatorze o konfiguracji stawowej, jeśli trzeci przegub zastąpimy przegubem pryzmatycznym, to otrzymamy **konfigurację sferyczną** (rys.4.14). Przykładem takiej konfiguracji jest manipulator FUNAC (rys.4.15).

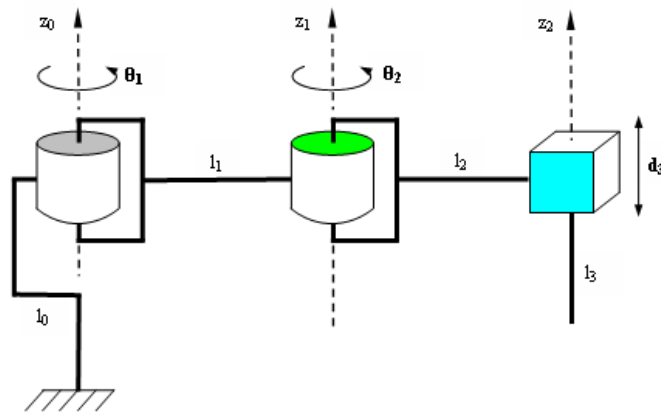


Rys.4.14. Konfiguracja sferyczna



Rys.4.15. Manipulator FUNAC

Innym przykładem konfiguracji (OOP) jest **manipulator typu SCARA** (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly - czyli stawowy robot montażowy selektywnie podatny) ostatnio coraz bardziej popularny. Robot ten został zaprojektowany z myślą o zadaniach montażowych (rys.4.16).



Rys.4.16. Konfiguracja manipulatora typu SCARA

W przeciwieństwie do manipulatora sferycznego, który ma osie z_0 , z_1 , z_2 wzajemnie prostopadłe, SCARA ma osie z_0 , z_1 , z_2 wzajemnie równoległe.

Przegląd robotów typu OOP

Potencjalne zastosowania robotów OOP to produkcja urządzeń elektronicznych montowanych na płytach drukowanych, zadania z mikro-mechaniki przy produkcji zegarków, instrumentów czy też w przemyśle optycznym np. do precyzyjnego szlifowania.

Roboty te są uniwersalnymi środkami automatyzacji procesów przemysłowych, przede wszystkim procesów uciążliwych lub trudnych do wykonania przez człowieka. Roboty mogą być stosowane do automatyzacji prac wykonywanych przez maszyny lub mogą same wykonywać pewne prace przy użyciu narzędzi, jak np. lutowanie, wiercenie, szlifowanie, stępienie krawędzi.

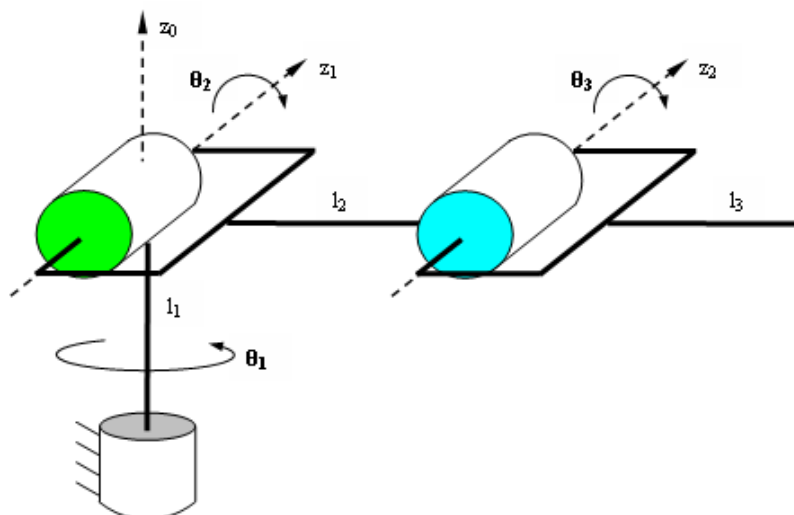
System sterowania robota jest oparty na technice komputerowej, co umożliwia robotowi wykonanie skomplikowanych funkcji, jak: układanie lub pobieranie przedmiotów według wzoru, realizację bardzo długich programów, ruch prostoliniowy - pionowy, ruchy obrotowe, poszukiwanie przedmiotów o nieznanym z góry położeniu. Możliwe jest również dokonywanie poprawek w programach, wykonywanie skoków warunkowych itp. Funkcje te umożliwiają użytkownikowi stosowanie robotów do różnych skomplikowanych zadań bez konieczności stosowania specjalnych urządzeń współpracujących z robotami.

Tabela 4.3. Roboty firmy ADEPT wraz z parametrami technicznymi

Robot	Parametry techniczne
 <i>Rys.4.17. Robot Adept Cobra 600</i>	Zasięg - 600mm Obciążenie – 5,5kg Cykl - 0,47s Powtarzalność - $\pm 0,02$ mm Waga - 34kg Żywotność - 60 milionów cykli
 <i>Rys.4.218 Robot Adept Cobra 800</i>	Zasięg - 600mm Obciążenie – 5,5kg Cykl - 0,52s Powtarzalność - $\pm 0,02$ mm Waga - 35kg Żywotność - 60 milionów cykli
 <i>Rys.4.19. AdeptOne-XL</i>	Zasięg - 1067mm Obciążenie - 25kg Cykl – 0,26s Powtarzalność - $\pm 0,038$ mm Waga - 266kg Żywotność - 120 milionów cykli

4.3.4. Konfiguracja antropomorficzna (OOO)

Konfiguracja ta nazywana jest również stawową lub obrotową (*rys.4.20*). W tej grupie można wyróżnić dwa zasadnicze rozwiązania konstrukcyjne. Pierwsze z nich to manipulator z „łokciem”, (*rys.4.21*). Drugi to struktura z „równoległobokiem” (*rys.4.22*). Struktura z równoległobokiem, chociaż mniej zwinna posiada jednak wiele zalet, najważniejszą z nich to: silnik trzeciej osi umieszczony jest w członie pierwszym. Ponieważ cały ciężar silnika obciąża człon pierwszy to człony drugi i trzeci mogą być lżejsze, dzięki czemu można stosować do ich napędzania silniki o mniejszej mocy. Również dynamika manipulatorów równoległobocznych jest prostsza niż manipulatorów z łokciem.



Rys.4.20. Konfiguracja manipulatora stawowego



Rys.4.21. Manipulator PUMA




Rys.4.22. Manipulator IRB 4401 firmy ABB

Przegląd robotów typu OOO

SCORBOT (rys.4.23) skonstruowany został do celów dydaktycznych. Celowo zastosowana skąpa obudowa pozwala obserwować działanie całego mechanizmu napędowego, składającego się z silników prądu stałego, przekładni zębatych i pasków transmisyjnych. Maksymalny udźwig 1kg (razem z chwytakiem) i dokładność ruchów 0,5mm są wystarczające do zastosowań edukacyjnych. SCORBOT daje również możliwość zapoznania się z różnymi sposobami sterowania i programowania robotów.

Tabela 4.4. Robot SCORBOT oraz jego parametry techniczne

Robot	Parametry techniczne
 <p style="text-align: center;"><i>Rys.4.23. Robot SCORBOT-ER 5plus</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - udźwig: 1kg - zasięg: 610mm - prędkość: 660mm/s - dokładność: ± 0.15mm - kontrola położenia: enkodery optyczne - chwytak dwupalcowy równoległy - waga 10,8kg - kontroler: ACL Controller-A - temp. pracy: 2 - 40°C - zasilanie 110/220 VAC, 50/60 Hz - porty I/O - 16 inputs; 16 outputs - mikroprocesor: Motorola 68010




Jego łańcuch kinematyczny zbudowany jest z: bazy, korpusu, ramienia, łokcia i chwytaka. Wraz z chwytakiem, którego konstrukcja zapewnia dużą elastyczność w przestrzeni roboczej, manipulator posiada 6 stopni swobody. Konfigurację o trzech ruchach rotacyjnych uzyskano poprzez obrót korpusu, ramienia i łokcia, chwytak posiada możliwość obrotu w dwóch kierunkach.

Chwytak robota napędzany jest przez dwa niezależne silniki, które umożliwiają pracę chwytaka w bardzo szerokim zakresie. W trakcie programowania robota są one traktowane jako dwie osobne osie. Siła chwytu może być kontrolowana, co pozwala na pracę z delikatnymi materiałami (szkło, tworzywo sztuczne).

Manipulator wyposażony jest w ręczny panel kontrolny TEACH PENDANT, który służy do poruszania robota w poszczególnych osiach, definiowania pozycji, ustawiania osi na zdefiniowanych pozycjach, czy uruchamiania zaprogramowanych komend. Wyposażony jest w dwuliniowy ciekłokrystaliczny wyświetlacz (32 znaki), pozwalający na wyświetlanie komend, pozycji, informacji systemu sterowania. Posiada trzydzieści klawiszy funkcyjnych. Wiele z nich jest odpowiednikami komend języka ACL. Oprócz ręcznego sterowania robot można programować również w systemie SCORBASE oraz w zaawansowanym środowisku języka ACL. Programowanie w języku ACL daje nam możliwość programowania współbieżnego (kilka programów wykonujących się jednocześnie).

Roboty firmy KUKA. Roboty tej serii mają największy zakres możliwości manipulacyjnych, jak również posiadają możliwość pracy w trudnych warunkach (np. pracy w odlewniach).

Tabela 4.5. Roboty firmy KUKA oraz ich zastosowanie

Robot	Zastosowanie
 <p data-bbox="459 846 737 875"><i>Rys.4.24. Robot KR6/2</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - zgrzewanie łukowe - składowanie i wysyłanie - montaż - maszynowy dozór - plombowanie - paletowanie - manipulowanie - selektywne wybieranie - pakowanie - mierzenie, badanie - cięcie plazmowe
 <p data-bbox="387 1267 810 1301"><i>Rys.4.25. Robot KR 30 L 15/2 (EX)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - zgrzewanie łukowe - składowanie i wysyłanie - laserowe cięcie i zgrzewanie - cięcie plazmowe - montaż - maszynowy dozór - plombowanie - paletowanie - manipulowanie - selektywne wybieranie - pakowanie - mierzenie, badanie
 <p data-bbox="448 1724 751 1758"><i>Rys.4.26. Robot KR150/2</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - zgrzewanie - składowanie i wysyłanie - ciśnieniowe łączenie i nitowanie - laserowe cięcie i zgrzewanie - cięcie plazmowe - cięcie strumieniem wody - szlifowanie, polerowanie, itp. - montaż - maszynowy dozór - plombowanie - paletowanie - manipulowanie - selektywne wybieranie - pakowanie - mierzenie, badanie



Rys.4.27. Panel sterowania robotów firmy KUKA

Konstruktorzy firmy KUKA opracowali zintegrowany kontroler **KUKA KR C2**, który w znacznym stopniu uprościł obsługę i programowanie robota.

Zalety kontrolera

Standaryzacja – usystematyzowane pojęcia i podstawowe wielkości dla wszystkich rodzajów robotów pozwalające sterować robotami nawet o ośmiu stopniach swobody

Niezawodność – modułowa konstrukcja zgodna z standardem PC gwarantuje kompatybilność i solidność poszczególnych elementów systemu sterowania

Przyjazna obsługa – zgodność sterownika z wszystkimi rodzajami robotów pozwala na łatwą obsługę wszystkich robotów firmy KUKA bez konieczności ponownej nauki obsługi sterownika. Dodatkową zaletą jest przejrzysty i intuicyjny system rozmieszczenia klawiszy funkcyjnych na ręcznym panelu sterowania.

Bezpieczeństwo – elektroniczne zabezpieczenia wymiany danych i komunikacji ESC (Electronic Safety Concept), dodatkowe zabezpieczenia przed niepożądanymi zmianami w programie, możliwość uruchomienia robota tylko po włożeniu specjalnego klucza do stacyjki na ręcznym panelu sterowania, łatwo dostępny awaryjny wyłącznik pracy robota.

Diagnostyka – mocno rozbudowany system samodiagnozy działający w oparciu o zasadę szukania usterek i przyczyn ich wystąpienia, dzięki czemu można w łatwy sposób naprawiać zaistniałe awarie.


Otwarta architektura – elastyczne cyfrowe i analogowe porty I/O pozwalają na niczym nieograniczoną komunikację z urządzeniami peryferyjnymi jak i innymi robotami, dodatkowo istnieje możliwość diagnozowania i sterowania pracą robota poprzez sieć Ethernet.

„Windows” Teach Pendant – interfejs sterowania jest zgodny z standardem, Windows co umożliwia intuicyjne poruszanie się w opcjach systemu dzięki wbudowanej klawiaturze oraz tzw. „space mouse” pozwalającej na kontrolowanie 6

osiami robota. Dodatkowo 8" kolorowy wyświetlacz znacznie ułatwia poruszanie się po systemie sterowania.

AdeptSix 300 6-Axis Robot – znajduje zastosowanie w przenoszeniu ciężkich przedmiotów w trzech wymiarach, istnieje możliwość wyposażenia robota w dodatkowy moduł Kobra, który zwiększa jego możliwości adaptacyjne przy pracy w ciężkich warunkach.

Tabela 4.6. Robot AdeptSix i jego parametry techniczne

Robot	Parametry techniczne
 <p><i>Rys.4.28. Robot AdeptSix 300 6-Axis Robot</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - zasięg poziomy: 677mm - zasięg pionowy: 1019mm - udźwig(max): 3kg - powtarzalność: $\pm 0,020$mm - max. prędkości par kinematycznych: <ul style="list-style-type: none"> przegub J1 – 210 [°/s] przegub J2 – 170 [°/s] przegub J3 – 225 [°/s] przegub J4 – 300 [°/s] przegub J5 – 300 [°/s] przegub J1 – 420 [°/s] - masa robota: 30kg

4.4. Klasyfikacja na podstawie budowy jednostki kinematycznej

4.4.1. Jednostki monolityczne

Do tego typu konstrukcji zalicza się jednostki kinematyczne o stałej, nie zmiennej konstrukcji mechanizmu. Producent dostarcza wszystkie niezbędne zespoły ruchu wraz z efektem zgodnie z oczekiwaniami odbiorcy. Przy obecnym rozwoju techniki należy zauważyć, iż jednostki monolityczne znajdują coraz mniejszą grupę odbiorców ze względu na wymagania związane z elastycznością zrobotyzowanych systemów produkcyjnych.

4.4.2. Jednostki modułowe

Do tego typu konstrukcji zalicza się jednostki kinematyczne złożone zgodnie z potrzebami z dostarczonych przez producenta gotowych zespołów ruchu (modułów). Pomimo że producent nie ogranicza możliwych do zestawienia struktur, jednak są one ograniczone przez własności mechaniczne i dynamiczne dostarczonych modułów. Na rys.4.29 przedstawiono przykładową jednostkę modułową o konfiguracji kartezjańskiej produkowaną przez firmę ADEPT. Przykładowo odbiorca do-

starcza informacji na temat żądanych zakresów ruchu poszczególnych członów manipulatora, a producent dostarcza odpowiednie moduły wraz z układem zasilania i sterowania.

W zależności od procesu technologicznego, w którym ma być wykorzystany robot, jednostki modułowe mogą być bardzo wygodnym rozwiązaniem ze względów ekonomicznych oraz technologicznych.



Rys.4.29. Przykład jednostki modułowej firmy ADEPT

4.4.3. Jednostki pseudomodułowe

Do tej grupy konstrukcji zalicza się jednostki o stałej strukturze kinematycznej, ale dopuszczonej przez producenta możliwości wymiany przez użytkownika niektórych zespołów ruchu, z reguły będących na końcu łańcucha kinematycznego.



Na rys.4.30 zilustrowano przykładową jednostkę pseudomodułową o konfiguracji antropomorficznej z możliwością zastosowania odpowiedniej końcówki roboczej. W zależności od wymagań technologicznych, końcówką roboczą może być na przykład urządzenie zgrzewające lub chwytak.

Rys.4.30. Przykład jednostki pseudomodułowej

4.5. Klasyfikacja ze względu na obszar zastosowań

- **Roboty przemysłowe** – są to roboty wykorzystywane przy szeroko pojętych zadaniach przemysłowych. Początkowo były tylko stosowane przy przenoszeniu materiałów i spawaniu. Obecnie znajdują zastosowanie chyba w każdym przemyśle a liczba ich stale wzrasta. Poniżej przedstawiono niektóre z ich zastosowań.
- **Roboty usługowe** – robot, który działa półautonomicznie lub autonomicznie wykonując usługi użyteczne dla dobra ludzi oraz sprzętu, wyłączając operacje przemysłowe (definicja według Międzynarodowej Federacji Robotyki). Przez usługi dla ludzi rozumie się działanie robotów na rzecz zapewniania bezpie-

czeństwa ludzi oraz dostarczanie rozrywki, natomiast usługi użyteczne dla sprzętu rozumiane są tu jako serwisowanie, dokonywanie napraw oraz czyszczenie. Innym przeznaczeniem tego typu robotów jest pełnienie dodatkowych autonomicznych funkcji takich jak inspekcja, transportowanie oraz pozyskiwanie danych.

- **Roboty mobilne** – są to roboty z napędem kołowym lub gąsienicowym, znajdujące zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i techniki. Podstawowym kryterium ich klasyfikacji jest ilość kół napędzanych i kierowanych.
- **Roboty kroczące** – jest to grupą robotów szybko rozwijających się przeznaczonych do realizacji różnych wybranych funkcji lokomocyjnych.
- **Roboty latające** – roboty poruszające się w trój wymiarze, przeznaczony np. do celów zwiadowczych itp.
- **Roboty podwodne** – roboty przeznaczone do badań głębin morskich, zastosowań badawczo-naukowych, ratownictwie, kontroli technicznej urządzeń podwodnych oraz w zadaniach wojskowych takich jak ochrona przeciwmino-wa, szpiegostwo itp.

5. CHWYTAKI ROBOTÓW

Chwytaaki są tą częścią robota, która:

- bezpośrednio współpracuje z manipulowanym przedmiotem,
- od której w istotny sposób zależy dokładność manipulacyjna,
- która nie może być wykonana przez producenta jako część uniwersalna do wszystkich, ani choćby do wielu zastosowań.

Chwytaak jest niezbędnym wyposażeniem jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej wykonującej w procesie produkcyjnym zadanie transportowe. Często zdarza się, że użytkownik musi sam zaprojektować i wykonać chwytak do swoich mniej typowych zastosowań i dlatego omówiono dość szczegółowo różne konstrukcje chwytaków.

Zadanie transportowania obiektu przez maszynę manipulacyjną składa się z trzech elementarnych czynności:

- uchwycenie manipulowanego przedmiotu,
- trzymania obiektu w trakcie jego transportowania,
- uwolnienia obiektu w miejscu docelowym.

Chwytaak jest urządzeniem nakładającym na transportowany obiekt tyle ograniczeń swobody ruchu, ile potrzeba do zapewnienia pożądanego w danym procesie produkcyjnym przebiegu transportowania. Ograniczenia swobody ruchu transportowego obiektu realizowane są dwoma sposobami:

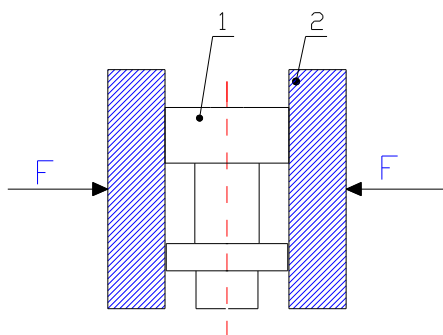
- przez wytworzenie pola sił działających na obiekt - chwytanie siłowe (*rys.5.1*),
- przez wytworzenie połączeń między elementami chwytaka i obiektem, których więzy odbierają obiektowi żadaną liczbę stopni swobody - chwytanie kształtowe (*rys.5.2*).

Oba sposoby oddziaływania powinny być na tyle skuteczne, aby w czasie transportowania, na skutek powstania sił odśrodkowych i bezwładności, obiekt nie zmienił przypadkowo swego położenia względem określonych elementów chwytaka.

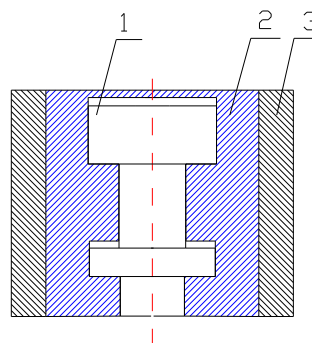
Stosując jako kryterium podziału sposób uchwycenia przedmiotu rozróżnia się następujące rodzaje chwytania przedmiotu:

- uchwycenie przez obejmowanie,
- chwytanie cierne,
- chwytanie przez przyssanie,
- chwytanie magnetyczne.

Ogromna różnorodność obiektów manipulacji sprawiła, że chwytaki są obecnie najbardziej zróżnicowanym konstrukcyjnie zespołem maszyny.



Rys.5.1. Sposób chwytania siłowy



Rys.5.2. Chwytanie kształtowe

1. obiekt manipulacji
2. elementy chwytające
3. nasadki na elementy chwytające

Wiele czynników ma zasadniczy wpływ na uchwycenie obiektu np. właściwości manipulowanego obiektu, właściwości chwytne chwytaka, błąd wzajemnego ustawienia obiektu i chwytaka przez jednostkę kinematyczną maszyny manipulacyjnej.

Istotny wpływ na warunki uchwycenia obiektu mają następujące właściwości obiektu: masa, położenie środka ciężkości, moment bezwładności, kształt i parametry geometryczne, tolerancje wykonania miejsc uchwycenia, odporność na naprężenia zewnętrzne.

5.1. Klasyfikacja chwytaków

W niniejszym opracowaniu zaproponowano następujące kryteria podziału rozwiązań konstrukcyjnych chwytaków maszyn manipulacyjnych:

- realizowany sposób chwytania,
- budowę,
- parametry użytkowe,
- system mocowania i wymiany w jednostce kinematycznej maszyny manipulacyjnej,
- wyposażenie dodatkowe.

Ze względu na realizowany sposób chwytania wyróżnia się chwytaki:

- siłowe, sposób chwytania siłowego przedstawiono na *rys.5.1*,
- kształtowe, sposób chwytania kształtowego przedstawiono na *rys.5.2*.

W przypadku chwytaków siłowych siły oddziałujące na obiekt manipulacji mogą być typu:

- naprężającego (ściskającego, rozciągającego),
- przyciągającego.

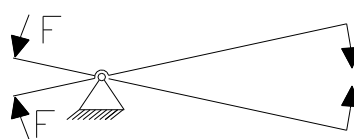
Ze względu na zasadnicze różnice w budowie wyróżniono chwytaki:

- ze sztywnymi końcówkami chwytanymi,

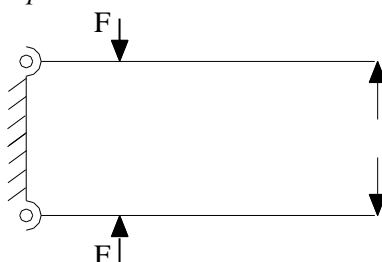
- ze sprężystymi końcówkami chwytными,
- z elastycznymi końcówkami chwytными,
- adhezyjne (podciśnieniowe, magnetyczne),
- specjalne urządzenia chwytające.

W zależności od sposobu przemieszczania się końcówek chwytных pod wpływem siły wytworzonej przez mechanizm napędowy wyróżnia się ruch końcówek:

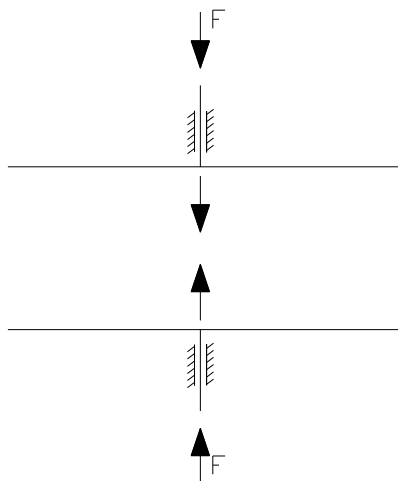
- nożycowy, zilustrowany na rys.5.3,
- szczypcowy, przedstawiony na rys.5.4,
- imadłowy, pokazany na rys.5.5.
-



Rys.5.3. Nożycowy sposób przemieszczania końcówek chwytных



Rys.5.4. Szczypcowy sposób przemieszczania komórek chwytных chwytaków

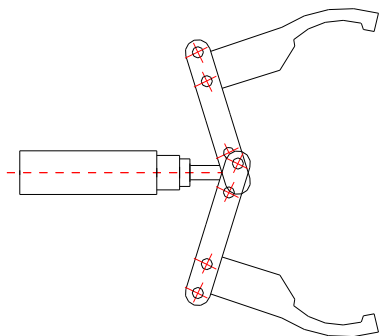


Rys.5.5. Imadłowy sposób przemieszczania komórek chwytных chwytaków

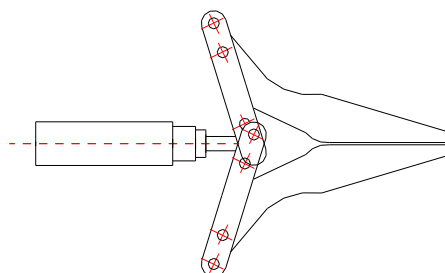
Podział chwytaków ze względu na parametry użytkowe może dotyczyć:

- dysponowanej siły chwytu,

- granicznych wymiarów chwytanego obiektu,
- dopuszczalnych kształtów obiektu,
- czasu uchwycenia obiektu manipulacji.



Rys.5.6. Chwytnik zewnętrzny



Rys.5.7. Chwytnik wewnętrzny

Można wyróżnić również chwytaki przeznaczone do chwytu zewnętrznego (rys.5.6) i chwytu wewnętrznego (rys.5.7).

5.1.1. Chwytaki siłowe

Chwytaki siłowe podczas chwytania działają na obiekt manipulacji siłami w stronę powierzchni obiektu albo przeciwnie - od obiektu w kierunku chwytania. W pierwszym przypadku, charakterystycznym dla chwytania dwiema przeciwległymi końcówkami (rys.5.3), na obiekt działają dwie równe, co do wartości, przeciwnie skierowane siły. Na powierzchni obiektu powstają naprężenia, a w czasie manipulowania obiektem pojawia się siła tarcia statycznego, przeciwdziałająca przemieszczaniu się obiektu względem chwytaka. W praktyce stosowane jest często chwytanie siłowo-kształtowe. Końcówki chwytne chwytaka swoim kształtem ograniczają swobodę ruchu obiektu i jednocześnie działając na obiekt siłami uniemożliwiają mu przemieszczanie się w kierunkach niezabezpieczonych ograniczeniami kształtowymi.

Przykład 5.1

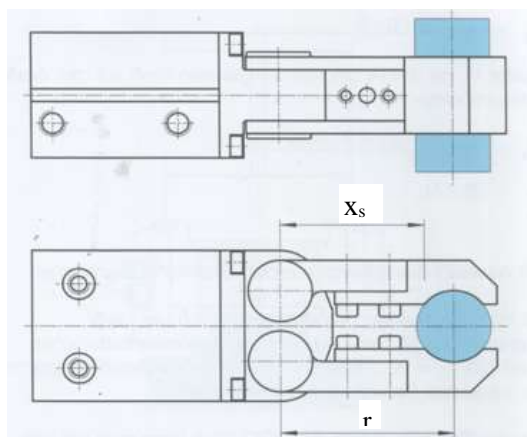
Dobrać chwytak siłowy pneumatyczny w taki sposób, aby rozwiązać problem chwytania detalu (tulei) w celu sprawdzenia istnienia otworu, w sposób, w jaki ilustruje to rys.5.8, mając dane przedstawione w tabeli 5.1 i schemat chwytaka (rys.5.9).



Rys.5.8 Proces sprawdzania otworu w detalu

Tabela 5.1. Dane do przykładu 5.1

promień końcówki chwytnej	$r = 60$ [mm]
środek ciężkości końcówki chwytnej	$x_s = 40$ [mm]
masa manipulowanego detalu	$m_d = 0.2$ [kg]
masa końcówki chwytnej	$m_c = 0.06$ [kg]
masowy moment bezwładności (względem osi obrotu końcówki chwytnej)	$J = 3 \cdot 10^{-4}$ [kg·m ²]
ciśnienie robocze	$p = 600$ [kPa] = 6 [bar]
współczynnik bezpieczeństwa (wynosi 2÷4)	$S = 4$
tarcie (pomiędzy detalem a końcówką chwytą)	$\mu = 0.2$
przyciąganie ziemskie	$g = 9.81$ [m/s ²]



Rys.5.9 Schemat chwytaka

Rozwiązanie:

Istnieją dwie możliwości rozwiązania tego problemu. Pierwsza to zaprojektowanie własnego chwytaka, takie podejście jednak może być zastosowane głównie w przypadku, gdy istnieje uzasadniona potrzeba użycia niestandardowego chwytaka. Alternatywnym rozwiązaniem, uzasadnionym głównie ekonomicznie jest zaku-

pienie chwytaka w firmie zajmującej się ich produkcją. Wykorzystując katalogi chwytaków, posiadające informacje techniczne można dobrać odpowiedni chwytak. W tym przykładzie posłużono się katalogami chwytaków firmy *FESTO*.

Analizując katalog chwytaków zdecydowano się na wykorzystanie chwytaka serii HGR.

Obliczenie potrzebnej siły chwytu chwytaka:

$$F_{ch} = \frac{1}{2} \frac{m_d g S}{\mu} \quad (5.1)$$

wartość $\frac{1}{2}$ została wprowadzona do równania przedstawionego powyżej, ponieważ chwytak posiada 2 końcówki chwytne (2 ramiona).

$$F_{ch} = \frac{1}{2} \frac{0.2[\text{kg}] \cdot 9.81[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}] \cdot 4}{0.2} = 19.62[\text{N}]$$

Obliczenie potrzebnego momentu chwytającego chwytaka:

Posiadając informację o promieniu r końcówki chwytnej oraz wykorzystując obliczoną siłę chwytu F_{ch} można obliczyć moment chwytający następująco:

$$M_{ch} = F_{ch} r \quad (5.2)$$

$$M_{ch} = 19.62[\text{N}] \cdot 60[\text{mm}] = 1177.2[\text{Nmm}] = 117.72[\text{Ncm}]$$

Wyznaczony moment chwytający M_{ch} działa na zewnętrznej części końcówki chwytnej chwytaka.

Dobór odpowiedniego chwytaka z katalogu:

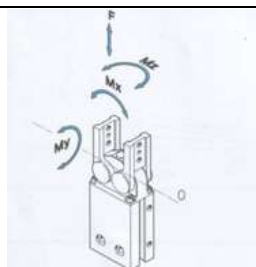
Oprócz danych o modelu chwytaka takich jak: podstawowe wymiary, podstawowe parametry eksploatacyjne w katalogach zawarte są informacje o obciążeniach, jakie może przenieść chwytak i tak przykładowo dla chwytaków serii HGR firmy *FESTO* można odczytać wartości momentów chwytających M operujących na zewnętrznej części końcówki chwytnej przedstawionych w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Wartości momentów M dla poszczególnych modeli chwytaków zaczerpnięte z katalogów firmy *FESTO*

typ chwytaka	wartości momentów chwytających M
HGR-16-A	25 [Ncm]
HGR-25-A	80 [Ncm]
HGR-32-A	150 [Ncm]
HGR-40-A	250 [Ncm]

Tabela 5.3. Maksymalne wartości obciążenia chwytaków serii HGR firmy FESTO

Natomiast w tabeli 5.3, również zaczerpniętej z katalogów chwytaków firmy FESTO, podano wartości maksymalnych obciążeń chwytaków serii HGR.



Obciążenie	HGR-16-A	HGR-25-A	HGR-32-A	HGR-40-A
F statyczne [N]	25	39	55	83
Mx statyczne [Nm]	0.3	0.6	1	1.9
My statyczne [Nm]	1.5	3	4.7	9.9
Mz statyczne [Nm]	1	2	3.2	6.7

Na podstawie wartości momentów chwytających M z tab.5.2 oraz momentu chwytającego M_{ch} wyznaczonego na drodze obliczeniowej można stwierdzić iż najbliższa wartość momentu M większa od obliczonej wartości momentu M_{ch} jest związana z chwytakiem **HGR-32-A** (tab.5.2). Po przyjęciu chwytaka i sprawdzeniu pozostałych założeń zawartych w tab.5.1, należy wykonać obliczenia sprawdzające.

Sprawdzenie naprężeń dopuszczalnych chwytaka:

$$F_{statyczne,max} = 55[N]$$

$$F_{statyczne} = (m_c + \frac{1}{2}m_d)g = (0.06[kg] + \frac{1}{2} \cdot 0.2[kg]) \cdot 9.81[\frac{m}{s^2}] = 1.57[N]$$

$$F_{statyczne} < F_{statyczne,max} \quad \underline{\text{warunek spełniony!}}$$

$$M_{y,statyczne,max} = 4.7[Nm]$$

$$M_{y,statyczne} = (m_c x_s + \frac{1}{2}m_d r)g =$$

$$= (0.06[kg] \cdot 40[mm] + \frac{1}{2} \cdot 0.2[kg] \cdot 60[mm]) \cdot 9.81[\frac{m}{s^2}] = 82.4[Nmm] = 0.0824[Nm]$$

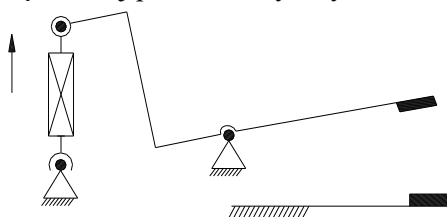
$$M_{y,statyczne} < M_{y,statyczne,max} \quad \underline{\text{warunek spełniony!}}$$

W celu wykonania operacji sprawdzania tulei należy zastosować chwytak **HGR-32-A** firmy FESTO.

5.1.2. Chwytaki ze sztywnymi końcówkami

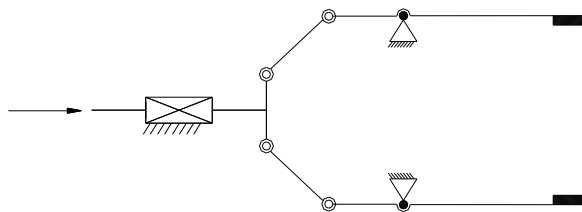
Sztywno zamocowane do mechanizmu napędowego końcówki chwytne, nieodkształcające się przy wywieraniu nacisku na powierzchnie obiektu manipulacji, stwarzają możliwość łatwego przystosowania chwytaka dla różnych obiektów i do

różnych warunków procesu manipulacji obiektem. Wymiana kształtowych nasadek końcówek chwytanych umożliwia uchwycenie obiektu o dowolnych kształtach i wymiarach. Kątowe lub linowe przemieszczenie końcówek chwytanych, a także zakres tych przemieszczeń oraz wartość siły chwytu zależą od struktury kinematycznej i parametrów geometrycznych mechanizmu chwytaka. Jako kryterium klasyfikacyjne rozwiązań konstrukcyjnych mechanizmów chwytaków ze sztywnymi końcówkami przyjęto liczbę i rodzaj par kinematycznych.



Rys.5.10. Rozwiązanie mechanizmu chwytaka zawierającego tylko pary klasy V

Najprostszym rozwiązaniem mechanizmu chwytaka zawierającego wyłącznie pary kinematyczne V klasy jest siłownik, którego cylinder jest połączony sztywno z jedną końcówką chwytaka, a tłok bezpośrednio lub pośrednio przez dźwignię dwuramienną z końcówką drugą (rys.5.10). Najliczniejszą grupę tej klasy stanowią chwytaki z mechanizmem zawierającym 7 par kinematycznych, realizującym szczypcowy ruch końcówek chwytaków (rys.5.11).



Rys.5.11. Chwytnik realizujący szczypcowy ruch końcówek

Zaletą chwytaków wyposażonych w mechanizm zawierający wyłącznie pary kinematyczne V klasy jest prosta budowa połączeń w parach kinematycznych, zapewniająca zwartość i ułatwiająca wykonanie konstrukcji. Przez zastosowanie łożysk tocznych w obrotowych parach kinematycznych wpływ sił tarcia można ograniczyć do minimum.

Do niedogodności natomiast należy zaliczyć:

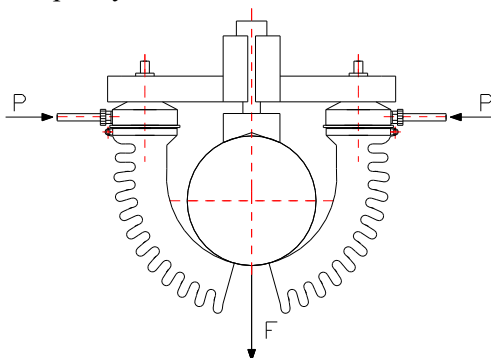
- obciążenie napędu mechanizmu siłami bocznymi w przypadku niesymetrycznego obciążenia końcówek chwytanych,
- zależności sił tarcia od położenia końcówek chwytanych,
- zmienności siły chwytu w całym zakresie chwytania,
- niezmienności początkowego i końcowego położenia końcówek chwytanych, tym samym stały zakres ich przemieszczania.

5.1.3. Chwytaiki z elastycznymi końcówkami

Elastyczne końcówki chwytne zmieniając swój kształt pod wpływem dostarczonej energii (zwykle sprężonego powietrza) oddziałują na obiekt manipulacji w taki sposób, że powodują jego siłowo-kształtowe unieruchomienie. W przykładowym rozwiązaniu konstrukcyjnym chwytaka z elastycznymi końcówkami dwie umieszczone przeciwległe końcówki chwytne wykonane ze specjalnie wyprofilowanego elastomeru mają nierówne pola powierzchni i pod wpływem sprężonego powietrza podawanego do ich wnętrza odkształcają się łukowo (rys.5.12).

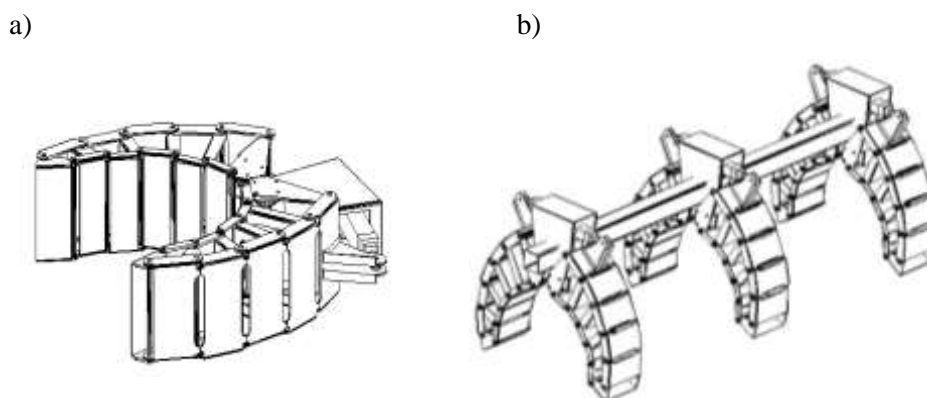
Do zalet chwytaków z elastycznymi końcówkami, dzięki którym znajdują one coraz większe zastosowanie, należy zaliczyć:

- możliwość chwytania przedmiotów kruchych (np. szkło), z narażonymi na uszkodzenie powłokami, różniących się kształtem i wymiarem,
- możliwość budowania chwytaków wielokończówkowych - dużą uniwersalność rozwiązań,
- możliwość łatwego nastawienia wartości siły chwytu przez zmianę wartości ciśnienia w końcówkach,
- dobre przyleganie do powierzchni obiektu manipulacji,
- tanie wykonanie i prosty montaż.



Rys.5.12. Przykład chwytaka z elastycznymi końcówkami na przykładzie rozwiązania firmy CARL FREUDENBERG

Inna ciekawa konstrukcja chwytaka z elastycznymi końcówkami została przedstawiona na rys.5.13a i rys.5.13b.



Rys.5.13 Konstrukcja chwytaka elastycznego

W uproszczeniu chwytak ten można opisać jako urządzenie złożone z dwóch łańcuchów: zewnętrznego i wewnętrznego. Każde ogniwo łańcucha jest napędzane własnym siłownikiem. Czujnik umieszczony na zakończeniu każdego z ogniw, w momencie docisku wewnętrznego łańcucha z przedmiotem, powoduje włączenie siłownika kolejnego ogniwa. W rezultacie chwytak dopasowuje swój kształt do elementu przez niego obejmowanego.

Tego typu zaciski mogą być wykorzystane do przenoszenia przedmiotów o niejednorodnej powierzchni. Są skierowane głównie do pracy, w której nie ma określonego cyklu przenoszenia jednakowych przedmiotów. Każde ogniwo łańcucha ma prostą budowę, co daje dużą niezawodność pracy.

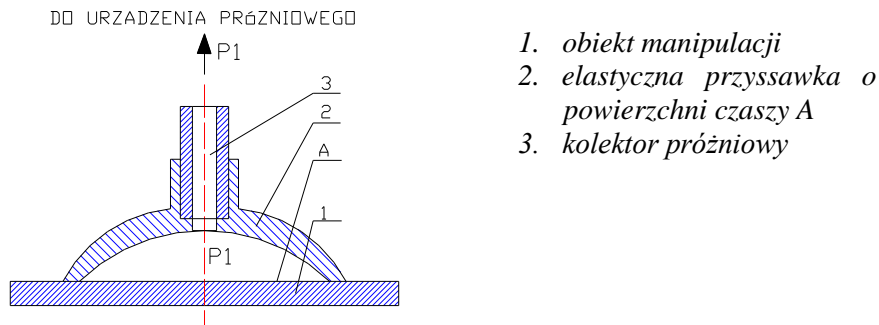
5.1.4. Chwytki podciśnieniowe

Ze względu na prostotę konstrukcji chwytaków podciśnieniowych, niewielki ciężar i zwykle mały koszt wykonania, chwytaki te są powszechnie stosowane. Jednak ich zastosowanie ograniczone jest następującymi warunkami:

- przenoszone mogą być tylko te obiekty, które mają powierzchnię płaską lub kulistą o dużej gładkości,
- niezbędna jest szczelność przyssawki - przeszkodą jest występowanie drobin (opiłków metali) między obrzeżem przyssawki, a powierzchnią chwytanego obiektu,
- ze względu na określone pojemności urządzenia oraz konieczności wytworzenia określonej wartości podciśnienia, czas uchwycenia jest większy niż w przypadku innych chwytaków;
- trwałości przyssawki gumowej jest niewielka,
- ograniczona temperatura stosowania (do 400°C dla wyższych temp. nawet do 1200°C stosuje się przyssawki z poliuretanu),
- między przyssawką a obiektem powinna powstać siła tarcia statycznego,

- dla zapewnienia zwolnienia obiektu, przewyciężenia częstego zjawiska tzw. Przyssania obrzeża przyssawki, należy wprowadzić do czaszy przyssawki dodatkowy krótkotrwały impuls ciśnieniowy,
- chwytaki te są przyczyną hałasu powstającego w wyniku rozprężenia gazu, przez zastosowanie tłumików możliwe jest zredukowanie hałasu do kilkunastu dB.

Zasada budowy chwytaka podciśnieniowego została przedstawiona na rys.5.14.

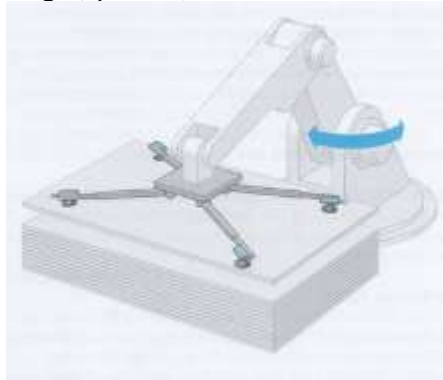


Rys.5.14. Budowa chwytaka podciśnieniowego

Najczęściej w procesie manipulacji z wykorzystaniem chwytaków podciśnieniowych (przyssawek) wykorzystuje się specjalnie zaprojektowane urządzenia wyposażone w odpowiednią ilość przyssawek. Dobór oraz liczba przyssawek jest związana z obliczeniami.

Przykład 5.2

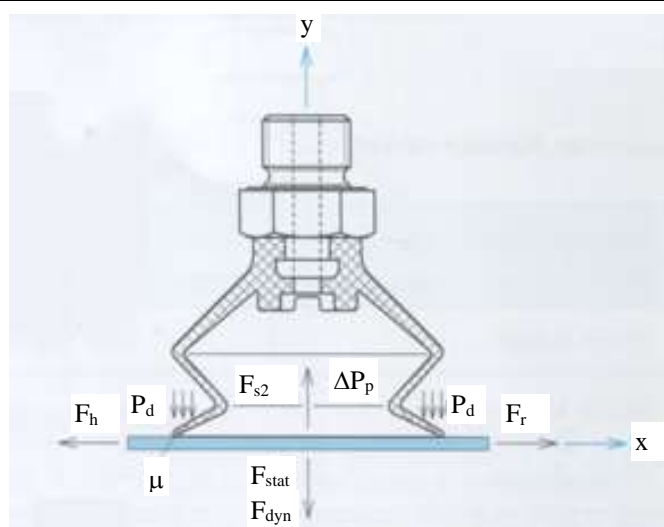
Dobrać typ i ilość chwytaków podciśnieniowych (przyssawek), aby rozwiązać problem podnoszenia i obracania płyt fornirowych dla zrobotyzowanego stanowiska przedstawionego na rys.5.15, mając dane przedstawione w tab.5.4 i schemat chwytaka podciśnieniowego (rys.5.16).



Rys.5.15. Proces podnoszenia i obracania płyt fornirowych

Tabela 5.4. Dane do przykładu 5.2

ciężar płyt	$m_p = 40 \text{ [kg]}$
kąt obrotu płyt przez manipulator robota	$180^\circ = \pi$
promień obrotu płyt	$r = 0.8 \text{ [m]}$
czas obrotu dla 180°	$t = 1 \text{ [s]}$
podciśnienie	$\Delta p_p = -70 \text{ [kPa]} = -0.7 \text{ [bar]}$
tarcie (pomiędzy przysawką a płytą fornirową)	$\mu = 0.7$
przyciąganie ziemskie	$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$



Rys.5.16. Schemat przysawki

Rozwiązanie:

Wykorzystując katalogi chwytaków, można dobrać odpowiednie rodzaje przysawek oraz ich ilość. W tym przykładzie posłużono się, podobnie jak w poprzednim przykładzie, katalogami chwytaków firmy *FESTO*.

Analizując katalog chwytaków zdecydowano się na wykorzystanie przysawek typu VAS-125-^{3/5}-NBR. Założenia związane z przysawkami należy sprawdzić w toku obliczeń.

Obliczenia obciążenia statycznego:

$$F_{stat} = Q = m_p \cdot g \tag{5.3}$$

$$F_{stat} = m_p \cdot g = 40 \text{ [kg]} \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 329.4 \text{ [N]}$$

Obliczenie potrzebnej siły ssącej przy obciążeniu statycznym (współczynnik bezpieczeństwa $S=2$):

$$F_{s1} = F_{stat} \cdot S \quad (5.4)$$

$$F_{s1} = 392.4[N] \cdot 2 = 784.8[N]$$

Obliczenia obciążenia dynamicznego:

Z powodu szybkiego ruchu obrotowego płyty podczas manipulacji należy wykonać dokładne obliczenia związane z ruchem obrotowym.

Ruch obrotowy dla 180° w jednej sekundzie można zapisać w postaci dwóch ruchów ($\varphi=90^\circ=\pi/2$ w czasie $t_1=0.5[s]$) tak, więc można obliczyć przyspieszenie kątowe jako:

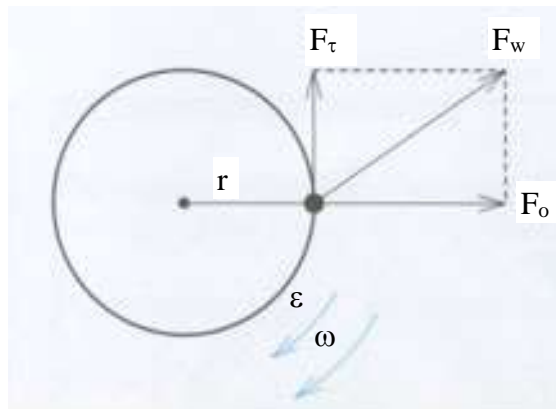
$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \varphi}{t^2} \quad (5.5)$$

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \frac{\pi}{2}}{(0.5)^2} = 12.6 \left[\frac{1}{s^2} \right]$$

Obliczenie prędkości kątowej:

$$\omega = \varepsilon \cdot t \quad (5.6)$$

$$\omega = 12.6 \left[\frac{1}{s^2} \right] \cdot 0.5[s] = 6.3 \left[\frac{1}{s} \right]$$



Rys.5.17. Rozkład sił na przyssawkach

Obliczenie siły odśrodkowej:

$$F_o = m_p \cdot \omega^2 \cdot r \quad (5.7)$$

$$F_o = 40[kg] \cdot \left(6.3 \left[\frac{1}{s} \right] \right)^2 \cdot 0.8[m] = 1270.1[N]$$

Obliczenie siły stycznej:

$$F_\tau = m_p \cdot \varepsilon \cdot r \quad (5.8)$$

$$F_t = 40[\text{kg}] \cdot 12.6\left[\frac{1}{\text{s}^2}\right] \cdot 0.8[\text{m}] = 403.2[\text{N}]$$

Obliczenie siły wypadkowej zgodnie z rys.5.17:

$$F_w = \sqrt{F_o^2 + F_t^2} \quad (5.9)$$

$$F_w = \sqrt{(1270.1[\text{N}])^2 + (403.2[\text{N}])^2} = 1332.6[\text{N}]$$

Obliczenie potrzebnej siły ssącej F_{s2} :

$$\sum F_x = 0: \quad F_t - F_w = 0 \quad \Rightarrow F_w = F_t \quad (5.10)$$

$$\sum F_y = 0: \quad F_{s2} - F_{dyn} - F_{stat} = 0 \quad \Rightarrow F_{dyn} = F_{s2} - F_{stat}$$

gdzie siła tarcia jest równa:

$$F_t = F_{dyn} \cdot \mu = (F_{s2} - F_{stat}) \cdot \mu \quad (5.11)$$

Wykorzystując równanie rzutu sił na oś x oraz powyższy wzór na siłę tarcia obliczono siłę ssącą: (pominięto przyspieszenie względem osi y)

$$F_{s2} = \frac{F_w}{\mu} + F_{stat} \quad (5.12)$$

$$F_{s2} = \frac{1332.6[\text{N}]}{0.7} + 392.4[\text{N}] = 2296.1[\text{N}]$$

Obliczenie liczby przyssawek:

Dla przyjętego typu przyssawki VAS-125⁻³/₈-NBR, dla której podciśnienie $\Delta p_u = -0.7[\text{bar}]$, siła ssąca odczytana z katalogu firmy *FESTO* jest równa $F_s = 606[\text{N}]$.

Wyznaczenie dynamicznego współczynnika bezpieczeństwa:

$$S_d = \frac{F_{s2}}{F_s} \quad (5.13)$$

$$S_d = \frac{2296.1[\text{N}]}{606[\text{N}]} = 3.79$$

tak, więc ilość przyssawek wynosi:

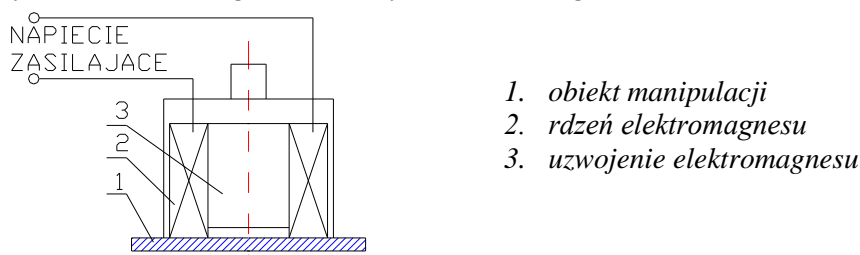
$$n > \frac{F_{s2} \cdot S_d}{F_s} \quad (5.14)$$

$$n > \frac{2296.1[N] \cdot 1.3}{606[N]} = 4.9$$

W celu zrealizowania przestawionego procesu przenoszenia płyt forniowych należy zastosować 5 przysawek typu VAS-125-³/₈-NBR.

5.1.5. Chwytki magnetyczne

W chwytkach magnetycznych, w celu wytworzenia pola sił działającego na ferromagnetyczny obiekt manipulacji stosuje się: magnesy trwałe, elektromagnesy oraz układy zbudowane z magnesów trwałych i elektromagnesów.



Rys.5.18. Budowa chwytaka elektromagnetycznego

W chwytaku z magnesem trwałym obiekt trzymany jest dzięki działaniu sił pola magnetycznego, a jego uwolnienie dokonywane jest mechanicznie np. za pomocą dodatkowego siłownika. W chwytakach z elektromagnesem (rys.5.18) obiekt trzymany jest w czasie przepływu prądu przez uzwojenie. W chwytakach z magnesem stałym i elektromagnesem obiekt jest trzymany przez magnes, a siła chwytu zwiększana dodatkowo podczas manipulowania obiektem przez włączenie prądu w uzwojeniu elektromagnesu. Uwolnienie obiektu następuje w tych przypadkach przez zmianę biegunowości elektromagnesu.

Niedogodności stosowania chwytaków magnetycznych związane są z:

- możliwością chwytania obiektów wykonanych wyłącznie z materiałów ferromagnetycznych,
- gwałtownymi przemieszczeniami obiektu manipulacji przy zbliżeniu się chwytaka (powoduje to utratę dokładności położenia początkowego obiektu),
- występowaniem magnetyzmu szczątkowego, który powoduje m.in. przyciąganie drobin metalowych oraz utrudnia uwolnienie obiektu,
- zmniejszenie się siły chwytu na skutek zabrudzenia miejsca uchwycenia np. opiłkami,
- wydzielaniem się ciepła w uzwojeniu elektromagnesu.

Ze względu na zmianę właściwości ferromagnetycznych maksymalna temperatura pracy chwytaków elektromagnetycznych wynosi ok. 60°C.

5.1.6. Chwytyki kształtowe

Uchwycenie obiektu manipulowanego przez chwytak kształtowy następuje przez wytworzenie połączeń między elementami chwytaka a obiektem, co pozbawia obiekt swobody ruchu względem elementów chwytających.

Cechy chwytania kształtowego wykazuje większość konstrukcji chwytaków siłowych, szczególnie ze sztywnymi końcówkami, które zaopatrywane są w nakładki częściowo dopasowane do kształtu obiektu w miejscu uchwycenia. Kształtowo mogą być także wykonane części chwytaków podciśnieniowych i magnetycznych, stykające się bezpośrednio z powierzchnią obiektu manipulacyjnego (przyssawka, czoło magnesu).

Typowe konstrukcje chwytaków kształtowych zawierają z reguły te same zespoły napędowe i mechanizmy kinematyczne co chwytaki siłowe, z tą jednak różnicą, że nakładki końcówek chwytanych nie przenoszą na uchwycony obiekt sił pochodzących od napędu końcówek.

Chwytyki kształtowe znalazły zastosowanie przy manipulowaniu obiektami:

- kruchymi, wiotkimi, powleczonymi powłokami wykluczającymi wywieranie jakiegokolwiek nacisku miejscowego,
- bardzo dużej masie, gdy stosowanie chwytania siłowego wymagałoby rozwijania bardzo dużych sił w zespole napędowym chwytaka dla zapewnienia odpowiednich sił tarcia statycznego na powierzchni styku końcówek chwytanych i obiektu,
- tak złożonym kształcie, że uniemożliwiającym stosowanie innych rodzajów chwytaków dla zapewnienia jednoznacznie określonego sposobu transportowania.

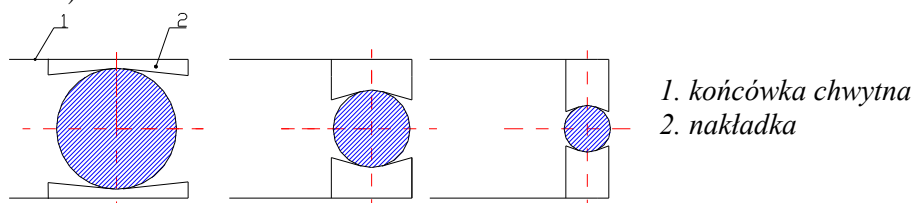
5.2. Wyposażenie chwytaków

Standardowo wykonane chwytaki mogą być wyposażone dodatkowo w różnego rodzaju elementy, zespoły lub mechanizmy, które umożliwiają zmianę lub poprawę warunków chwytania obiektu manipulacji albo pozwalają na równoległe do operacji manipulowania wykonywanie pewnych czynności technologicznych.

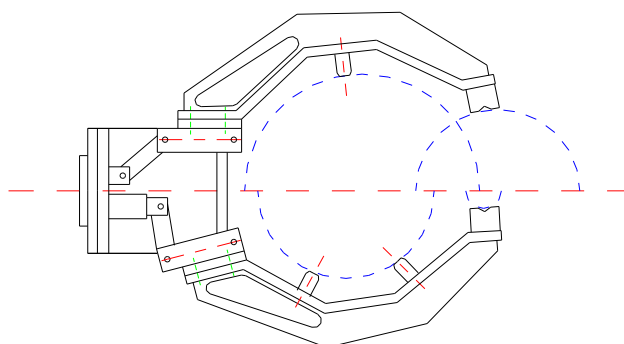
Typowym wyposażeniem chwytaków są: wymienne nakładki na końcówki chwytne, czujniki oraz pomocnicze urządzenia i narzędzia technologiczne.

Ze względu na różnorodność obiektów manipulacji oraz zmieniające się warunki pracy maszyny manipulacyjnej, nakładki na końcówki chwytne mogą pełnić następujące zadania: chwytanie obiektu o ściśle określonym kształcie, chwytanie obiektu o różnych wymiarach, ustawienie powierzchni styku końcówki chwytnej z obiektem według wymagań procesu produkcyjnego, zapewnienie elastycznego styku końcówki chwytnej z powierzchnią chwytanego obiektu, powodowanie żądanych w procesie produkcyjnym trwałych deformacji obiektu manipulacji w miejscu uchwycenia, izolowanie cieplne chwytaka. Na *rys.5.19* i *rys.5.20* przedstawiono dwa różne sposoby wykorzystania nakładek. Chwytanie obiektów o różnych wy-

miarach umożliwiając w pierwszym przypadku nakładki wymienne (rys.5.19), w drugim - stałe, ale rozmieszczone w różnych miejscach końcówki chwytnej (rys.5.20).



Rys.5.19. Nakładki wymienne na końcówki chwytne chwytania



Rys.5.20. Stałe nakładki rozmieszczone w różnych miejscach chwytaka

Podstawowymi czujnikami, w jakie wyposażone są chwytaki maszyn manipulacyjnych stosowanych współcześnie w robotyzacji procesów produkcyjnych, są:

- czujniki zbliżenia chwytaka lub końcówek chwytanych do obiektu
- czujniki dotyku końcówek chwytanych do powierzchni obiektu
- czujniki nacisku końcówek chwytanych na obiekt

Czujniki zbliżenia umożliwiają bezdotkowe zebranie wybranych informacji o obiekcie manipulacji. Jako czujniki zbliżenia wykorzystuje się przeważnie przetworniki indukcyjne, pojemnościowe oraz pneumatyczne (strumieniowo-siętrzące).

Jako czujniki dotyku wykorzystuje się z reguły elementy stykowe umieszczone w korpusie chwytaka w taki sposób, aby przemieszczenie końcówki chwytnej powodowało ich przełączenie.

Dla pomiaru nacisku końcówek chwytanych na obiekt manipulacji, wykorzystuje się przetworniki tensometryczne. Przez porównanie sygnału wyjściowego z układu pomiaru naprężeń w końcówkach chwytanych z zadaną wartością progową można uzyskać informację o uchwyceniu obiektu z odpowiednią wartością siły chwytu.

Pomocnicze urządzenia i narzędzia technologiczne stosowane jako wyposażenie chwytaków mogą realizować m.in. zadania:

- technologiczne, których wykonanie w trakcie manipulacji nie wpływa na pewność uchwycenia obiektu,

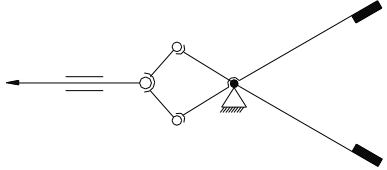
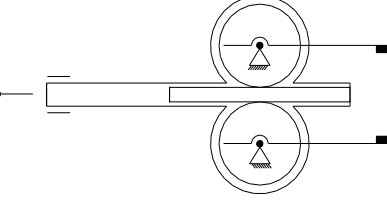
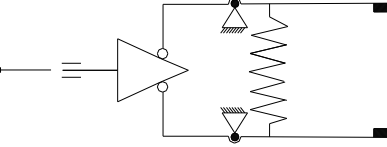
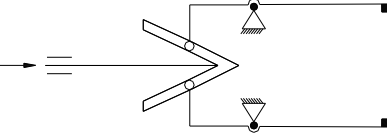
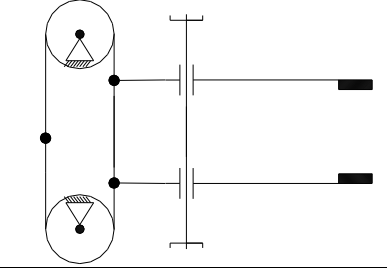
- eliminowania niedokładności wzajemnego ustawienia obiektu manipulacji i końcówek chwytanych albo obiektu manipulacji i urządzenia mocującego maszyny technologicznej,
- właściwego ukierunkowania (zorientowania) obiektu manipulacji.

Niektóre z tych urządzeń mogą stanowić integralną część mechanizmu chwytaka, inne są mocowane na korpusie chwytaka i sterowane lub napędzane całkowicie niezależnie.

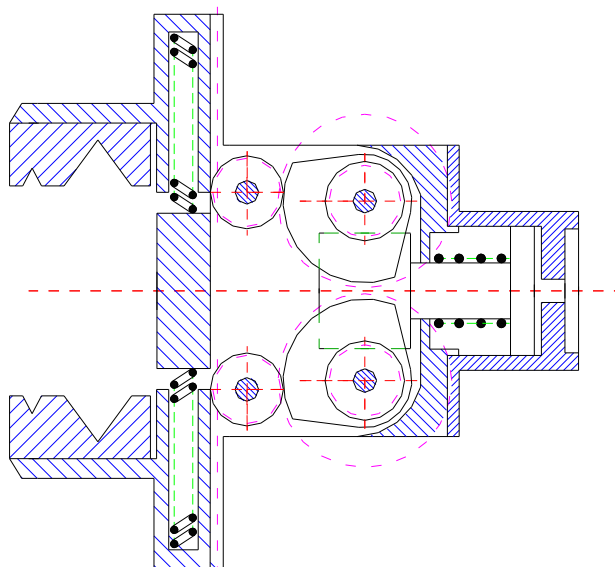
5.3. Przeniesienie napędu chwytaka

Niezwykle istotnym elementem chwytaków oraz innych urządzeń mechanicznych jest sposób przeniesienia napędu. Najczęściej spotykane układy przeniesienia napędu dla chwytaków przedstawione zostały w *tab.5.5*.

Tabela 5.5. Sposoby przeniesienia napędu

	napęd dźwigniowy
	napęd zębaty
	napęd klinowy
	napęd jarzmowy
	napęd ciągowy (łańcuchowy)



Przykład rozwiązania konstrukcyjnego chwytaka z napędem zębatym został przedstawiony na rys.5.21.



Rys.5.21. Rozwiązanie konstrukcyjne chwytaka z napędem zębatym

Obecnie obserwuje się dwa kierunki rozwoju budowy chwytaków. Chwytaki uniwersalne o budowie zbliżonej do budowy ludzkiej ręki i chwytaki specjalizowane do pracy tylko z jednym rodzajem przedmiotów. Niektóre rozwiązania konstrukcyjne pierwszego kierunku rozwoju budowy chwytaków przedstawiono w tab.5.6 takie rozwiązania są bardzo skomplikowane tak, więc do prostych operacji wykorzystuje się chwytaki kształtowe.

Tabela 5.6. Rozwiązania konstrukcyjne chwytaków zbliżonych w budowie do ludzkiej ręki

	<p>Najprostszym typem końcówki jest chwytak, który przy pomocy dwóch „palców” chwytka przenoszony przedmiot.</p>
	<p>Trójpalczasty chwytak w kształcie dłoni zbudowany przez K.J.Salisbury na Uniwersytecie Stanforda.</p>

	Czteropalczasty chwytak zbudowany w 1980r. na MIT.
	Omni-Hand. Jeden z najbardziej zbliżonych obecnie do ręki ludzkiej manipulatorów powstał na zlecenie NASA
	Dłoń Herzinger'a. Manipulator ten jest blisko dwukrotnie większy od dłoni ludzkiej jednak zachowanie jego jest zadziwiająco podobne do zachowania ludzkiej dłoni. Osiągnięto to dzięki zastosowaniu wielu czujników.

Właściwy dobór chwytaka ma decydujące znaczenie dla prawidłowego przebiegu procesu manipulacji. Metodyka projektowania chwytaka polega na:

1. wyborze sposobu uchwycenia,
2. wyborze typu chwytaka (zasady działania),
3. dobraniu parametrów konstrukcyjnych chwytaka,
4. przystosowaniu końcówek chwytanych do kształtu powierzchni obiektu.

5.4. Obliczenia chwytaka

Zadanie projektowe

Zaprojektować chwytak do robota przemysłowego spełniającego następujące wymagania:

- a) w procesie manipulacji urządzenie chwytające ma za zadanie pobrać (uchwycić) obiekt manipulacji w położeniu początkowym, trzymać go w trakcie trwania czynności manipulacyjnych i uwolnić go w miejscu docelowym,
- b) obiektem manipulacji są wałki i tuleje o zakresie średnic $d = 10 \div 100mm$, długości $l = 20 \div 200mm$ z mosiądzu lub stali,
- c) robot zasilany jest energią sprężonego powietrza o ciśnieniu nominalnym $p_n = 0,6MPa$.

Zakres projektu

1. Analiza zadania projektowego i ustalenie listy wymagań:
 - a) sprecyzowanie indywidualne wymiarów obiektu manipulacji oraz obliczenie jego masy,
 - b) przyjęcie czasu chwytania i uwalniania obiektu manipulacji,
 - c) wyznaczenie maksymalnej koniecznej siły chwytu $F_{ch\max}$ i obliczenie wymiarów szczęki.
2. Obliczenie ruchliwości chwytaka na podstawie zadanego schematu kinematycznego.
3. Przyjęcie modelu obliczeniowego chwytaka i wyznaczenie jego charakterystyki przesunięciowej $y = f_p(x)$. Przyjęcie wymiarów chwytaka i wyznaczenie maksymalnego skoku tłoczyska siłownika pneumatycznego $\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$ na podstawie obliczonego zakresu ruchu szczęk chwytaka $\Delta y = 2(y_{\max} - y_{\min})$.
4. Wyznaczenie charakterystyki prędkościowej chwytaka $\dot{y} = f_v(x) \dot{x}$.
5. Przyjęcie modelu obliczeniowego chwytaka i wyznaczenie jego charakterystyki siłowej $F_{ch} = f_F(x)F_S$.
6. Sprawdzenie metodą mocy chwilowych charakterystyki siłowej chwytaka na podstawie jego charakterystyki prędkościowej $f_F(x) = \frac{1}{2f_v(x)}$ dla jednego zadanego położenia i porównania wyników.
7. Obliczenia wytrzymałościowe chwytaka przy maksymalnych obciążeniach:
 - a) sprawdzenie warunku wytrzymałościowego na zginanie ramion chwytaka,
 - b) sprawdzenie warunku wytrzymałościowego na ścinanie dla najbardziej obciążonego sworznia.
8. Obliczenie wymaganych parametrów napędu pneumatycznego chwytaka i jego wstępny dobór.
9. Wykonanie rysunku złożeniowego chwytaka oraz rysunków wykonawczych zadanych części.

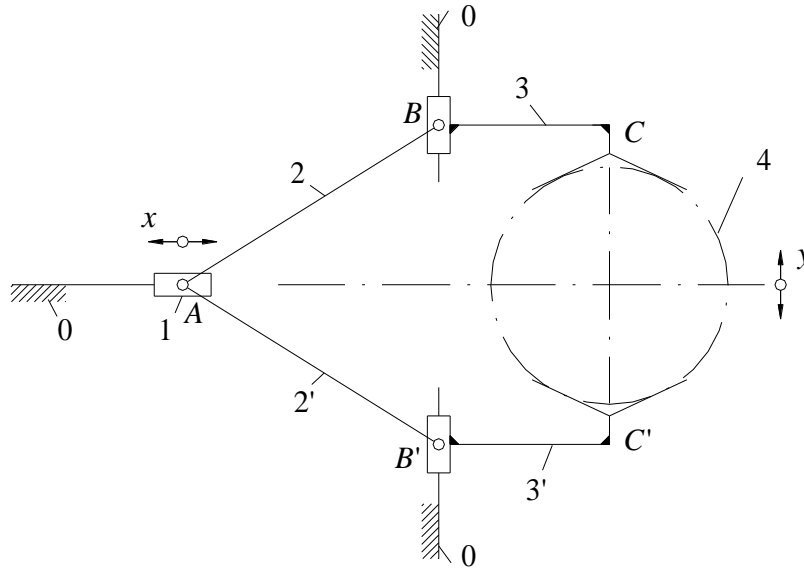
UWAGA Obliczenie punktów 3 ÷ 6 można przeprowadzać metoda analityczną lub grafoanalityczną. W przypadku stosowania metody grafoanalitycznej obliczenia należy przeprowadzić dla coraz najmniej czterech różnych położenia chwytaka w tym obowiązkowo dla dwóch położenia skrajnych (max. i min. rozwarcie szczęk chwytaka), a uzyskane dyskretne wyniki aproksymować odpowiednimi krzywymi.

Przy wyznaczaniu charakterystyki siłowej chwytaka należy przeprowadzić obliczenia statyczne pomijając siły ciężkości i bezwładności elementów chwytaka oraz

pomijając tarcie w jego parach kinematycznych. Tarcie występuje jedynie w parze kinematycznej pomiędzy szczękami chwytaka i obiektem manipulacji.

Przykład 5.3

Schemat kinematyczny chwytaka przedstawia rys.5.22.



Rys.5.22. Schemat kinematyczny chwytaka

1) Obliczenie ruchliwości chwytaka

$$r = 3n - 2p_5 - p_4 \tag{5.15}$$

gdzie: r – ruchliwość chwytaka,

n – liczba członów ruchomych, 0

p_5 – liczba par kinematycznych klasy piątej obrotowych i postępowych,

p_4 – liczba par kinematycznych klasy czwartej,

Dla powyższego schematu chwytaka mamy:

$$n = 5$$

$$p_5 = (0,1),(1,2),(1,2'),(2,3),(2',3'),(3,0),(3',0) = 7$$

$$p_4 = 0$$

$$r = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1$$

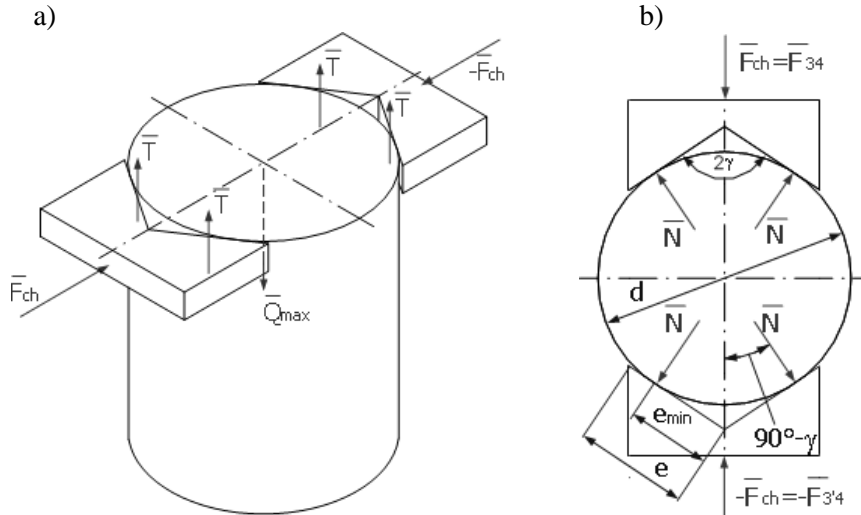
2) Wyznaczenie maksymalnej koniecznej siły chwytu F_{chmax} i obliczenie wymiarów szczęki

Dane:

d_{max} – maksymalna średnica obiektu manipulacji (wałka, tulei),

Q_{\max} – maksymalny ciężar obiektu manipulacji,
 μ – współczynnik tarcia między szczękami chwytaka a obiektem,
 $n = 2$ – współczynnik przeciążenia chwytaka (współczynnik bezpieczeństwa),
 2γ – kąt nachylenia szczek chwytaka.

Obiekt manipulacji chwytaka jest w pozycji jak na rys.5.23.



Rys.5.23. Układ sił działających na chwytak, a) rozkład sił tarcia podczas chwytania obiektu, b) rozkład sił normalnych podczas chwytania obiektu

$$F_{ch} = 2N \cos(90^\circ - \gamma)$$

$$N = \frac{F_{ch}}{2 \cos(90^\circ - \gamma)} = \frac{F_{ch}}{2 \sin \gamma} \quad T = \mu N = \frac{F_{ch} \mu}{2 \sin \gamma}$$

$$4T = \frac{2F_{ch} \mu}{\sin \gamma} \geq Qn \quad \text{stąd} \quad F_{ch} \geq \frac{Qn \sin \gamma}{2\mu}$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{d}{2e_{\min}} \quad \text{stąd} \quad e_{\min} = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \gamma} \quad \text{oraz} \quad e > e_{\min} = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \gamma}$$

3) Wyznaczenie charakterystyki przesunięciowej oraz prędkościowej chwytaka

Charakterystyka przesunięciowa chwytaka:

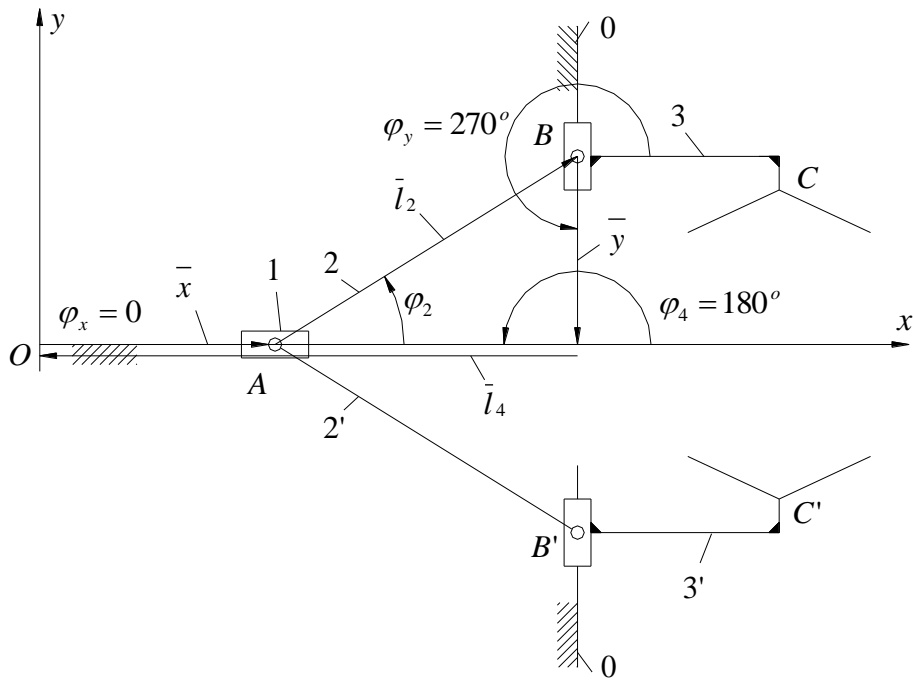
$$y = f_p(x) \tag{5.16}$$

gdzie

x – przesunięcie zespołu napędowego (tłoczyśka siłownika pneumatycznego)

y – przesunięcie końcówek chwytaka

$f_p(x)$ – przełożenie przesunięciowe mechanizmu chwytaka



Rys.5.24. Model obliczeniowy chwytaka do wyznaczania charakterystyki przesunięciowej i prędkościowej

Dane:

$$x = x(t), \varphi(x) = 0, l_2, \varphi_y = 270^\circ, l_4, \varphi_4 = 180^\circ$$

Wyznaczyć:

$\varphi_2, y, \dot{\varphi}_2, \dot{y}$, charakterystykę przesunięciową $y = f_p(x)$ oraz charakterystykę

prędkościową (przełożenie prędkościowe) $f_v(x) = \frac{\dot{y}}{\dot{x}}$

Zadanie zostanie rozwiązane metodą analityczną

Rozwiązanie:

$$\sum_{i=1}^4 \bar{l}_i = 0$$

$$\begin{aligned}
 \bar{x} + \bar{l}_2 + \bar{y} + \bar{l}_4 &= 0 \\
 x \cos \varphi_x + l_2 \cos \varphi_2 + y \cos \varphi_y + l_4 \cos \varphi_4 &= 0 \\
 x \sin \varphi_x + l_2 \sin \varphi_2 + y \sin \varphi_y + l_4 \sin \varphi_4 &= 0 \\
 x + l_2 \cos \varphi_2 - l_4 &= 0 \\
 l_2 \sin \varphi_2 - y &= 0
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Na podstawie (5.17) mamy:

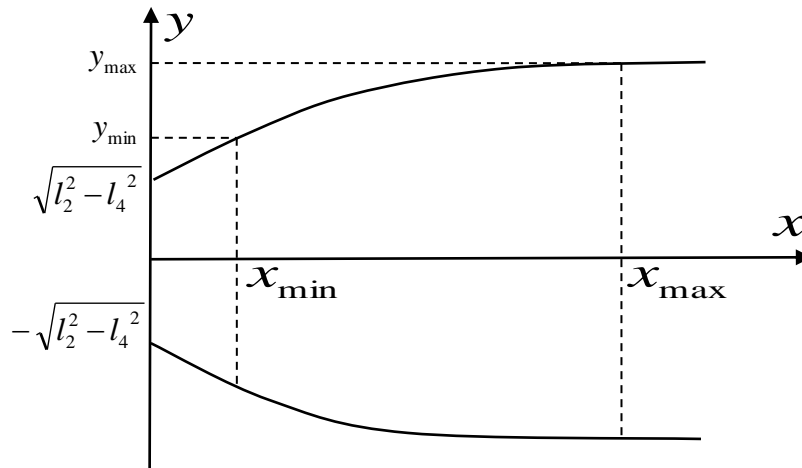
$$l_2 \cos \varphi_2 = l_4 - x$$

$$l_2 \sin \varphi_2 = y$$

stąd: $l_2^2 = (l_4 - x)^2 + y^2$

ostatecznie charakterystyka przesunięciowa chwytaka

$$y = \pm \sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2} \tag{5.18}$$



Rys.5.25. Charakterystyka przesunięciowa chwytaka

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{y}{l_4 - x} = \frac{\sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2}}{l_4 - x}$$

Obliczając pochodną względem czasu wyrażenia (5.18) otrzymujemy charakterystykę prędkościową

$$\dot{y} = \pm \frac{l_4 - x}{\sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2}} \dot{x} \quad \text{lub} \quad f_v(x) = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{l_4 - x}{\sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2}} \tag{5.19}$$

gdzie:

\dot{x}, \dot{y} – odpowiednio prędkości tłoczyska i prędkości końcówki chwytnej.

4) Wyznaczenie charakterystyki siłowej chwytaka

Charakterystyka siłowa (przełożenia siłowe) chwytaka

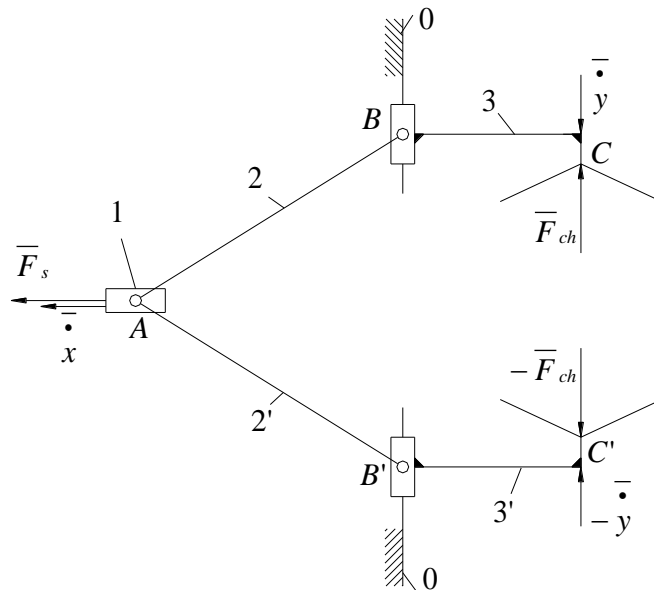
$$F_{ch} = f_F(x)F_s \quad (5.20)$$

gdzie:

F_s – siła na wyjściu zespołu napędowego (siłownika) chwytaka,

F_{ch} – siła chwytu,

$f_F(x)$ – przełożenie siłowe mechanizmu chwytaka.



Rys.5.26. Model obliczeniowy chwytaka do wyznaczenia charakterystyki siłowej

Ograniczamy się do analizy statycznej chwytaka pomijając siły ciężkości i siły bezwładności jego elementów oraz siły tarcia w parach kinematycznych.

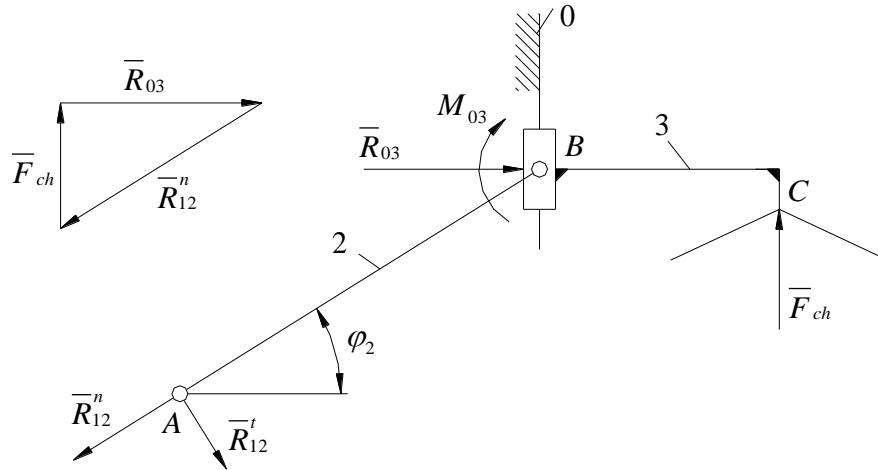
Ze względu na symetrię mechanizmu przeprowadzimy tylko analizę sił w grupie strukturalnej (2,3)

Analiza sił w grupie strukturalnej(2,3)

$$\sum \bar{P}_{i(2,3)} = 0 \Rightarrow \bar{R}_{12}^n + \bar{R}_{12}^\tau + \bar{R}_{03} + \bar{F}_{ch} = \bar{0} \quad (5.21)$$

$$\sum M_{iB(2)} = 0 \Rightarrow R_{12}^\tau \cdot AB = 0; R_{12}^\tau = 0 \quad (5.22)$$

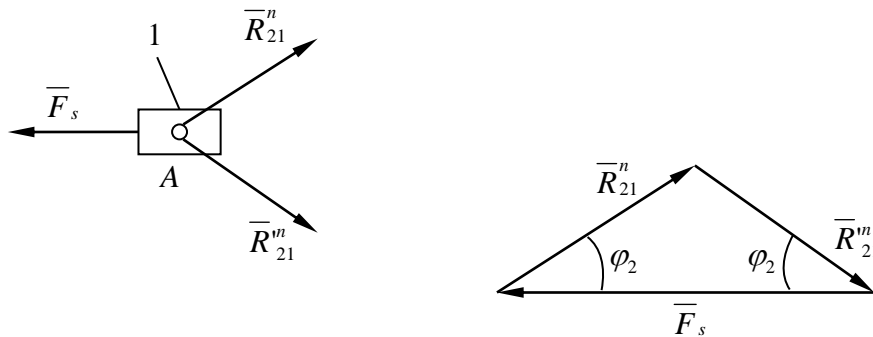
$$\sum M_{iB(3)} = 0 \Rightarrow -M_{03} + F_{ch}BC = 0; M_{03} = F_{ch} \cdot BC \quad (5.23)$$



Rys.5.27. Oswobodzenie od więzów oraz graficzne równania równowagi sił grupy strukturalnej (2,3)

Analiza sił dla członu napędzającego 1

$$\sum \bar{P}_{i(1)} = \bar{0} \Rightarrow \bar{F}_s + \underline{\underline{\bar{R}_{21}^n}} + \underline{\underline{\bar{R}_{21}^t}} = \bar{0} \quad (5.24)$$



Rys.5.28. Analiza sił dla członu napędzającego 1

Na podstawie rys.5.27 mamy:

$$R_{12}^n = \frac{F_{ch}}{\sin \varphi_2}$$

Na podstawie rys.5.28 mamy:

$$F_s = 2R_{21}^n \cos \varphi_2 = 2 \cdot F_{ch} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2$$

Stąd charakterystyka siłowa:

$$\frac{F_{ch}}{F_s} = \frac{tg \varphi_2}{2} = \frac{\sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2}}{2(l_4 - x)} = f_F(x) \quad (5.25)$$

5) Równanie mocy chwilowych dla chwytaka

Dla dowolnego chwytaka bilans mocy chwilowych przy pominięciu tarcia, sił ciężkości oraz bezwładności jego elementów ma postać:

$$N_{we} + N_{wy} = 0 \quad \text{gdzie} \quad N_{we} = \overline{F_s} \cdot \dot{x} \quad N_{wy} = 2\overline{F_{ch}} \cdot \dot{y} \quad (5.26)$$

czyli: $\overline{F_s} \cdot \dot{x} + 2\overline{F_{ch}} \cdot \dot{y} = 0$

stąd: $F_s \cdot \dot{x} - 2F_{ch} \cdot \dot{y} = 0 \quad (5.27)$



Rys.5.29. Model chwytaka do wyznaczenia bilansu mocy chwilowych

Na podstawie (5.27) można wyznaczyć charakterystykę siłową przy pomocy charakterystyki prędkościowej: $\overline{F_s}$

$$\frac{F_{ch}}{F_s} = \frac{\dot{x}}{2\dot{y}} \quad \text{lub} \quad f_F(x) = \frac{1}{2f_v(x)} \quad (5.28)$$

6) Obliczenie charakterystyki siłowej chwytaka na podstawie charakterystyki prędkościowej metodą mocy chwilowych

Dane: $V_A = \dot{x}$

Wyznaczyć charakterystykę prędkościową metodą planów prędkości

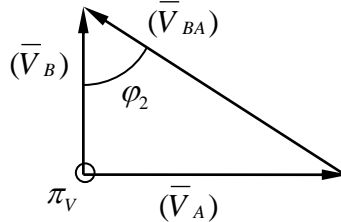
Rozwiązanie:

$$\underline{\underline{V_B}} = \underline{\underline{V_A}} + \underline{\underline{V_{BA}}}$$

$$// y - y // x - x \perp AB$$

Przyjmujemy podziałkę rysunkową prędkości: $k_v = \frac{V_A}{(V_A)}$ i rozwiązujemy wykre-

ślenie równania



Rys.5.30. Plan prędkości mechanizmu chwytaka

Charakterystyka prędkościowa: (\bar{V}_{BA})

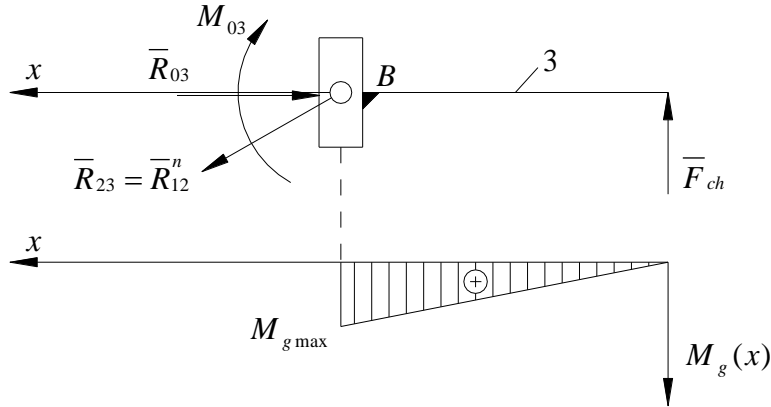
$$f_v(x) = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{(V_B)k_v}{(V_A)k_v} = \frac{V_B}{V_A} = \text{ctg} \varphi_2 = \frac{l_4 - x}{\sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2}}$$

Na podstawie równania mocy chwilowych mamy:

$$f_F(x) = \frac{1}{2f_v(x)} = \frac{\text{tg} \varphi_2}{2} = \frac{\sqrt{l_2^2 - (l_4 - x)^2}}{2(l_4 - x)} \quad (5.29)$$

Równanie (5.29) ma identyczną postać, co (5.25).

7) Obliczenia wytrzymałościowe chwytaka



Rys.5.31. Wykres momentów gnących dla ramienia chwytaka

Maksymalny moment gnący wynosi: $M_g(x)$

$$M_{g \max} = M_{03} = F_{ch} \cdot BC$$

Przyjmujemy przekrój prostokątny ramienia chwytaka o wskaźniku wytrzymałości na zginanie:

$$W_g = \frac{bh^2}{6}$$

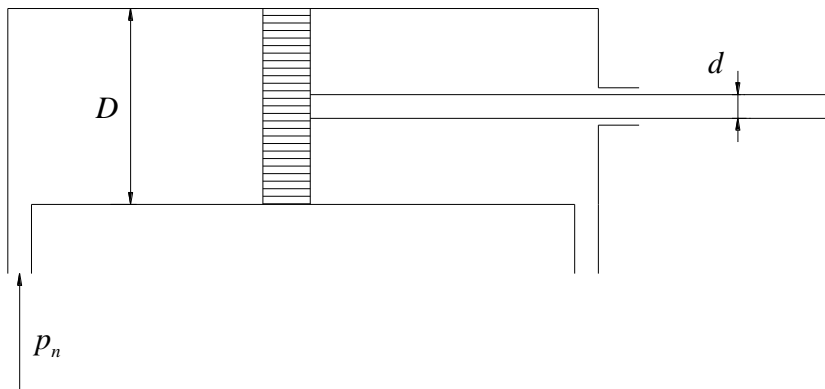
Warunek wytrzymałościowy na zginanie ramienia chwytaka ma postać:

$$\sigma_{g \max} = \frac{M_{g \max}}{W_g} = \frac{6F_{ch} \cdot Bc}{bh^2} \leq k_g \quad (5.30)$$

Warunek wytrzymałościowy na ścinanie sworznia w punkcie B ma postać:

$$\tau = \frac{F_{t \max}}{A} = \frac{R_{12}^n}{A} = \frac{F_{ch}}{bh \cdot \sin \varphi_2} \leq k_t \quad (5.31)$$

8) Obliczenie wymaganych parametrów napędu pneumatycznego chwytaka



Rys.5.32. Model siłownika pneumatycznego dwustronnego działania

Teoretyczna siła pchająca cylindra pneumatycznego:

$$P_{tp} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_n \quad (5.32)$$

Teoretyczna siła ciągnąca napędu pneumatycznego

$$P_{tc} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot p_n \quad (5.33)$$

gdzie: $p_n = 0,6MPa$ – ciśnienie nominalne zasilania.

Zasada doboru siłownika: $P_t \geq P_w$ (5.34)

gdzie: P_t – teoretyczna siła pchająca lub ciągnąca siłownik.

$$P_w = K \cdot F_{s \max} \quad (5.35)$$

$K = 1,2 \div 1,5$ – współczynnik przeciążenia;

$F_{s \max}$ – maksymalna siła na tłoczysku siłownika potrzebna do uzyskania maksymalnej niezbędnej siły chwytu

Zakładając czas ruchu (skoku) tłoka t i znając skok tłoka s można wyliczyć prędkość średnią tłoka:

$$v = \frac{s}{t} \left[\frac{dcm}{s} \right] \quad (5.36)$$

Zapotrzebowanie powietrza ze względu na ruch tłoka:

$$Q = F \cdot v \left[\frac{dcm^3}{s} \right] \quad (5.37)$$

gdzie:

F – powierzchnia tłoka $[dcm^2]$

v – prędkość średnia tłoka $\left[\frac{dcm}{s} \right]$

Potrzebna powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu:

$$f = \frac{F \cdot v}{\mu} \quad (5.38)$$

gdzie:

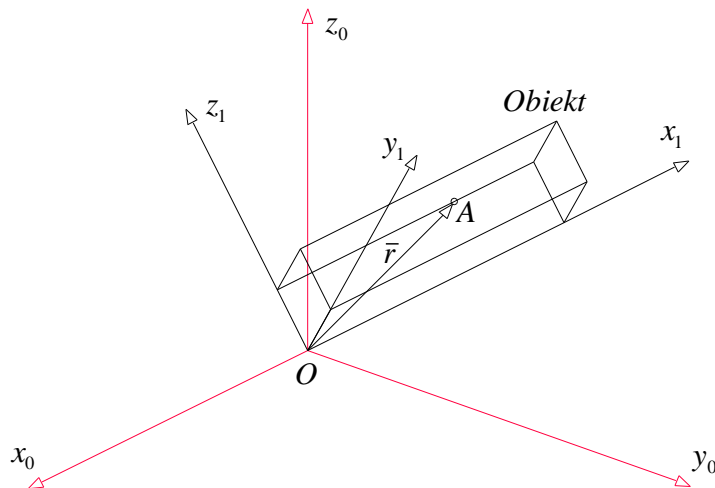
$\mu = 100 \left[\frac{dcm}{s} \right]$ - przeciętna prędkość przepływu powietrza

6. KINEMATYKA ROBOTÓW

Manipulator składa się z połączonych nieruchomo ciał (w przybliżeniu sztywnych), które wykonują złożone ruchy w przestrzeni roboczej. Dlatego też w celu opisanego oddzielnych członów i ich połączeń często wprowadza się aparat matematyczny, użyteczny z punktu widzenia obliczeń. W kinematyce manipulatorów i robotów bardzo ważnymi operacjami są obroty (rotacje) i przesunięcia (translacje) wykorzystywane w przekształceniu jednorodnym. Przekształcenie to można traktować jako operację, wyrażającą jednocześnie obroty i przesunięcia na jednej macierzy. Następnym krokiem w analizie kinematyki jest podanie równań kinematyki manipulatorów w różnych układach współrzędnych.

6.1. Obroty

Do opisanego obrotów wykorzystano układ współrzędnych $O x_0 y_0 z_0$ następnie przyjęto sztywny obiekt A (rys.6.1), z którym związano układ współrzędnych $O x_1 y_1 z_1$. Należy rozważyć, jakie zależności występują między współrzędnymi punktu P na obiekcie A w układzie współrzędnych $O x_1 y_1 z_1$, a współrzędnymi tego punktu w stałym (nieobróconym) układzie odniesienia $O x_0 y_0 z_0$. Przez $\{i_0, j_0, k_0\}$ oznaczono standardową bazę ortogonalną w układzie $O x_0 y_0 z_0$; gdzie i_0, j_0, k_0 są wektorami jednostkowymi (wersorami) odpowiednio wzdłuż osi x_0, y_0, z_0 . Analogicznie $\{i_1, j_1, k_1\}$ będzie standardową bazą ortogonalną w układzie $O x_1 y_1 z_1$.



Rys.6.1. Układ współrzędnych związany z ciałem sztywnym (obiektem)

Wektor \vec{r} od wspólnego początku O obu układów do punktu A (x, y, z to współrzędne punktu A) na obiekcie przedstawiono w układzie $O x_0 y_0 z_0$ następująco:

$$r_0 = x_0 i_0 + y_0 j_0 + z_0 k_0 \quad (6.1)$$

Natomiast ten sam wektor przedstawiono w układzie $O x_1 y_1 z_1$ następująco:

$$r_1 = x_1 i_1 + y_1 j_1 + z_1 k_1 \quad (6.2)$$

Wektor \bar{r} jest reprezentowany przez wektory r_0 i r_1 tak, więc związki pomiędzy składowymi wektora \bar{r} w obu układach współrzędnych zapisano w postaci:

$$r_{0,x} = r_0 i_0 = r_1 i_0 = x_1 i_1 i_0 + y_1 j_1 i_0 + z_1 k_1 i_0 \quad (6.3)$$

Analogiczne wzory otrzymano dla składowych $r_{0,y}$ i $r_{0,z}$:

$$r_{0,y} = x_1 i_1 j_0 + y_1 j_1 j_0 + z_1 k_1 j_0 \quad (6.4)$$

$$r_{0,z} = x_1 i_1 k_0 + y_1 j_1 k_0 + z_1 k_1 k_0 \quad (6.5)$$

Równania (6.3), (6.4), (6.5) przedstawiono w postaci równania wektorowego następująco:

$$r_0 = R_{1,0} r_1 \quad (6.6)$$

Macierz $R_{1,0}$ reprezentuje przekształcenie punktu P ze współrzędnych w układzie $O x_1 y_1 z_1$ na współrzędne w układzie $O x_0 y_0 z_0$ i zapisano ją w postaci:

$$R_{1,0} = \begin{bmatrix} i_1 i_0 & j_1 i_0 & k_1 i_0 \\ i_1 j_0 & j_1 j_0 & k_1 j_0 \\ i_1 k_0 & j_1 k_0 & k_1 k_0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Jeżeli punkt w układzie $O x_1 y_1 z_1$ określono za pomocą wektora r_1 , wówczas:

$$r_{1,x} = x_0 i_0 i_1 + y_0 j_0 i_1 + z_0 k_0 i_1 \quad (6.8)$$

$$r_{1,y} = x_0 i_0 j_1 + y_0 j_0 j_1 + z_0 k_0 j_1 \quad (6.9)$$

$$r_{1,z} = x_0 i_0 k_1 + y_0 j_0 k_1 + z_0 k_0 k_1 \quad (6.10)$$

Zapis powyższych równań w postaci macierzowej jest następujący:

$$r_1 = R_{0,1} r_0 \quad (6.11)$$

Macierz $R_{0,1}$ reprezentuje przekształcenie punktu P ze współrzędnych w układzie $O x_0 y_0 z_0$ na współrzędne w układzie $O x_1 y_1 z_1$ i zapisano ją w postaci:

$$R_{0,1} = \begin{bmatrix} i_0 i_1 & j_0 i_1 & k_0 i_1 \\ i_0 j_1 & j_0 j_1 & k_0 j_1 \\ i_0 k_1 & j_0 k_1 & k_0 k_1 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

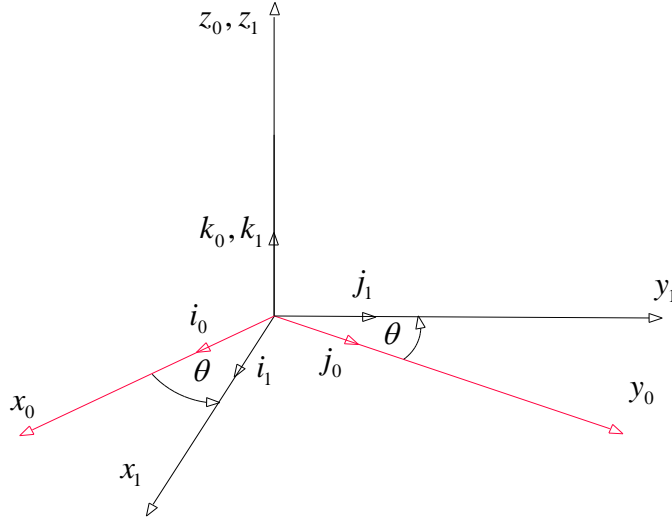
Macierz $R_{0,1}$ reprezentuje przekształcenie odwrotne do przekształcenia $R_{1,0}$:

$$R_{0,1} = [R_{1,0}]^T \quad (6.13)$$

Macierz, której odwrotnością jest macierz transponowana nazywa się macierzą ortogonalną. Ograniczając się do prawoskrętnego układu współrzędnych, wtedy $\det R_{1,0} = \pm 1$. Macierze ortogonalne o wyznaczniku +1 są nazywane macierzami obrotu lub rotacji.

Przykład 6.1

Układ $O x_1 y_1 z_1$ obrócono o kąt θ wokół osi z_0 (rys.6.2). Znaleźć macierz $R_{1,0}$ tego przekształcenia. Należy zwrócić uwagę, iż dodatni kierunek kąta θ jest określony regułą prawej ręki, to znaczy dodatni obrót o kąt θ wokół osi z daje przesunięcie śruby prawoskrętnej wzdłuż dodatniego kierunku osi z .



Rys.6.2. Obrót wokół osi z

Rozwiązanie:

Z analizy powyższego rysunku wynika, iż cosinusy kierunkowe dla poszczególnych wersorów można zapisać następująco uwzględniając, iż iloczyn długości odpowiednich wersorów jest równy jedności:

$$j_1 i_0 = \cos(90 + \theta) = -\sin(\theta) \quad i_1 i_0 = \cos(\theta) \quad k_1 k_0 = \cos(0) = 1$$

$$i_1 j_0 = \cos(90 - \theta) = \sin(\theta) \quad j_1 j_0 = \cos(\theta)$$

Pozostałe iloczyny występujące w macierzy (6.7) są równe zero. Tak, więc przekształcenie $R_{1,0}$ przedstawiono ostatecznie w postaci:

$$R_{1,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Powyzszą macierz nazwano podstawową macierzą obrotu lub rotacji (wokół osi z). Ze względów praktycznych wygodniejszy jest zapis $R_{z,\theta}$ zamiast $R_{1,0}$ do oznaczenia obliczonej symbolicznie macierzy. Analogicznie podstawowe macierze obrotów reprezentujące obroty wokół osi x i y wyznaczono oraz macierz $R_{z,\theta}$ zapisano:

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Przedstawione macierze obrotu (6.14) względem poszczególnych osi posłużą w dalszej części rozważań do przedstawienia formalizmu matematycznego zdolnego opisywać obroty i przemieszczenia poszczególnych robotów. Z tego względu zaleca się samodzielne rozwiązanie poniższych zadań.

Zadanie 6.1

Analogicznie jak dla przykładu 6.1, wyprowadzić macierz $R_{x,\theta}$ jeżeli układ $O x_1 y_1 z_1$ obrócono o kąt θ wokół osi x_0 .

Zadanie 6.2

Analogicznie jak dla przykładu 6.1, wyprowadzić macierz $R_{y,\theta}$ jeżeli układ $O x_1 y_1 z_1$ obrócono o kąt θ wokół osi y_0 .

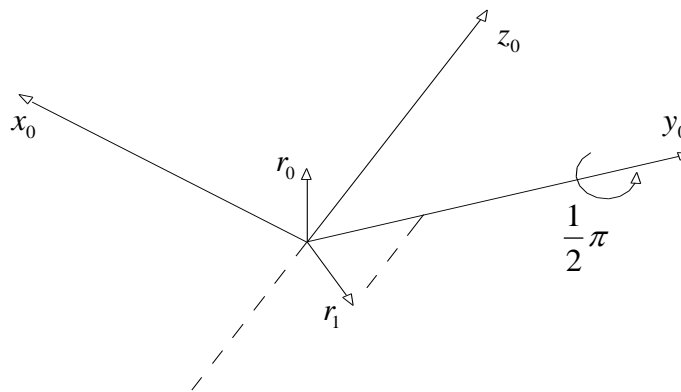
Zadanie 6.3

Znaleźć macierz $R_{0,1}$ reprezentującą przekształcenie odwrotne do przekształcenie wyznaczonego w przykładzie 6.1.

Można także interpretować daną macierz obrotu jako macierz wyznaczającą orientację układu współrzędnych $O x_1 y_1 z_1$ względem $O x_0 y_0 z_0$, gdyż kolumny macierzy $R_{1,0}$ są cosinusami kierunkowymi osi układu $O x_1 y_1 z_1$ w stosunku do osi układu $O x_0 y_0 z_0$.

Przykład 6.2

Dokonać obrotu wektora $r_0 = [1 \ 1 \ 0]^T$ wokół osi y_0 o kąt $\pi/2$, jak przedstawiono to na rys.6.3.



Rys.6.3. Obrót wektora wokół osi

Rozwiązanie:

Aby wyznaczyć wektor r_1 należy wykorzystać wzór (6.11), tak więc otrzymano:

$$r_1 = R_{y, \frac{1}{2}\pi} r_0 = \begin{bmatrix} \cos(\frac{1}{2}\pi) & 0 & \sin(\frac{1}{2}\pi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\frac{1}{2}\pi) & 0 & \cos(\frac{1}{2}\pi) \end{bmatrix} r_0$$

$$r_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wektor $r_1 = [0 \ 1 \ -1]^T$.

6.2. Składanie obrotów

Macierz $R_{1,0}$ opisuje obrót między układami współrzędnych $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$ i $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$. Jeżeli zostanie dołożony trzeci układ współrzędnych $O \ x_2 \ y_2 \ z_2$ powiązany z układami $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$ i $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$ przez obroty, to w takim przypadku punkt P może być reprezentowany na trzy sposoby przez wektory r_0, r_1, r_2 w trzech układach współrzędnych. Związki pomiędzy tymi reprezentacjami punktu przedstawiono następująco:

$$r_0 = R_{1,0} r_1 \tag{6.15}$$

$$r_0 = R_{2,0} r_2 \tag{6.16}$$

$$r_1 = R_{2,1} r_2 \tag{6.17}$$

Macierze $R_{1,0}$ i $R_{2,0}$ reprezentują obroty względem osi układu $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$, natomiast $R_{2,1}$ reprezentuje obrót względem układu $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$. Podstawiając wzór (6.17) do równania (6.15) otrzymano:

$$r_0 = R_{1,0} R_{2,1} r_2 \tag{6.18}$$

Po porównaniu równań (6.16) i (6.18) otrzymano równość:

$$R_{2,0} = R_{1,0} R_{2,1} \tag{6.19}$$

Powyższe równanie jest prawem składania dla obrotów. Innymi słowy aby przekształcić współrzędne punktu P z jego reprezentacji r_2 w układzie $O \ x_2 \ y_2 \ z_2$ na reprezentację r_0 w układzie $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$, można ją najpierw przekształcić na jego reprezentację r_1 w układzie $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$, używając macierzy $R_{2,1}$, a następnie przekształcić r_1 na r_0 używając macierzy $R_{1,0}$.

Równanie (6.18) można interpretować następująco. Założono, iż na początku wszystkie trzy układy pokrywają się. W pierwszej fazie obracany jest układ $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$ względem układu $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$ zgodnie z przekształceniem $R_{1,0}$. W fazie drugiej przy pokrywających się układach $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$ i $O \ x_2 \ y_2 \ z_2$, następuje obrót układu $O \ x_2 \ y_2 \ z_2$ względem układach $O \ x_1 \ y_1 \ z_1$ zgodnie z przekształceniem $R_{2,1}$. W każdym przypadku układ względem, którego odbywa się obrót, nazywa się układem bieżącym.

Przykład 6.3

Wyznaczyć macierz R reprezentującą obrót o kąt ϕ wokół bieżącej osi y z następnym obrotem o kąt θ wokół bieżącej osi z .

Rozwiązanie:

W przedstawionym przypadku macierz R jest reprezentowana przez złożenie dwóch obrotów:

$$R = R_{y,\phi} R_{z,\theta}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\theta) & -\cos(\phi)\sin(\theta) & \sin(\phi) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\phi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

Przykład 6.4

Wyznaczyć macierz R reprezentującą obrót o kąt θ wokół bieżącej osi z z następnym obrotem o kąt ϕ wokół bieżącej osi y .

Rozwiązanie:

Dokonując operacji odwrotnej do tej, jaką przeprowadzono w przykładzie 6.3, czyli najpierw obrót wokół osi z , a następnie wokół bieżącej osi y . Macierz obrotu określono wzorem:

$$R = R_{z,\theta} R_{y,\phi}$$

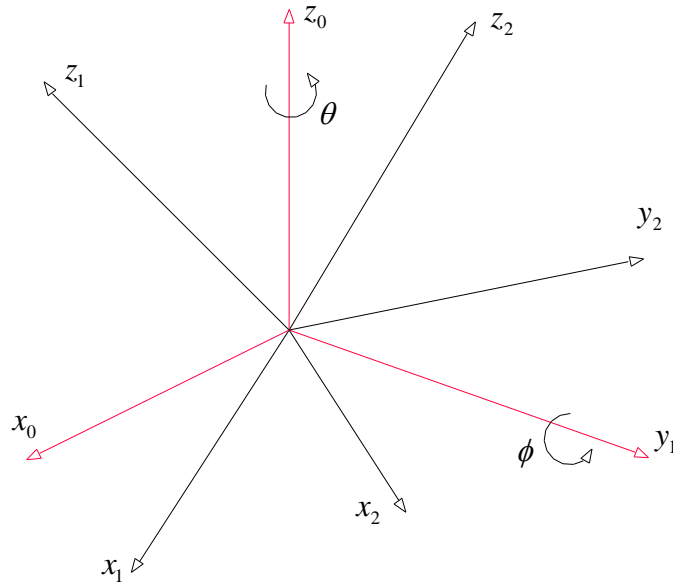
$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ \cos(\phi)\sin(\theta) & \cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta) \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

Bardzo istotna jest kolejność mnożenia macierzy, obrót w przeciwnieństwie do położenia nie jest wielkością wektorową i nie podlega prawu dodawania wektorów, wynika z tego, iż składanie obrotów na ogół nie jest przemienne.

W rzeczywistości wykonuje się raczej ciąg obrotów, każdego wokół danego ustalonego układu współrzędnych, niż wokół kolejnych bieżących układów. Na przykład można dokonać obrotu wokół osi x_0 , a następnie wokół osi y_0 (nie zaś y_1). Wtedy układ $O x_0 y_0 z_0$ jest układem ustalonym. W takim przypadku wcześniej określone prawo składania nie jest prawdziwe, natomiast właściwym prawem składania jest mnożenie kolejnych macierzy obrotów w kolejności odwrotnej do podanej wzorem (6.19). Należy zauważyć, że same obroty nie są wykonywane w odwrotnej kolejności, a raczej są one wykonywane wokół układu ustalonego niż bieżącego.

Przykład 6.5

Wyznaczyć macierz obrotu reprezentującą obrót o kąt ϕ wokół osi y_0 , a następnie obrót o kąt θ wokół ustalonej osi z_0 (rys.6.4). Niech r_0, r_1, r_2 będą reprezentacjami wektora \bar{r} .



Rys.6.4. Składanie obrotów

Rozwiązanie:

W pierwszej fazie osie ustalone i bieżące są te same, czyli $O x_0 y_0 z_0$ co umożliwia zapisanie jak poprzednio:

$$r_0 = R_{y,\phi} r_1$$

W drugiej fazie następuje obrót wokół ustalonego układu $O x_0 y_0 z_0$, a nie bieżącego układu $O x_1 y_1 z_1$ dlatego nie można stwierdzić, czy zachodzi zależność:

$$r_1 = R_{z,\theta} r_2$$

W takim wypadku należy cofnąć poprzedni obrót, a następnie wykonać obrót wokół osi z_0 i na koniec przywrócić wyjściowe przekształcenie, czyli:

$$r_1 = R_{y,-\phi} R_{z,\theta} R_{y,\phi} r_2$$

Podstawiając do równania opisującego wektor p w układzie $O x_0 y_0 z_0$ zależność przedstawioną powyżej i reprezentującą wektor p w układzie $O x_1 y_1 z_1$ otrzymano:

$$r_0 = R_{y,\phi} r_1 = R_{y,\phi} R_{y,-\phi} R_{z,\theta} R_{y,\phi} r_2$$

Dla danego układu ustalonego $O x_0 y_0 z_0$, układu bieżącego $O x_1 y_1 z_1$ i macierzy obrotu $R_{1,0}$ wiążącej te układy, jeżeli trzeci układ $O x_2 y_2 z_2$ jest otrzymany przez obrót $R_{2,1}$ wykonany względem układu bieżącego to, aby otrzymać obrót $R_{2,0}$ należy pomnożyć prawostronnie macierz $R_{1,0}$ z $R_{2,1}$:

$$R_{2,0} = R_{1,0} R_{2,1}$$

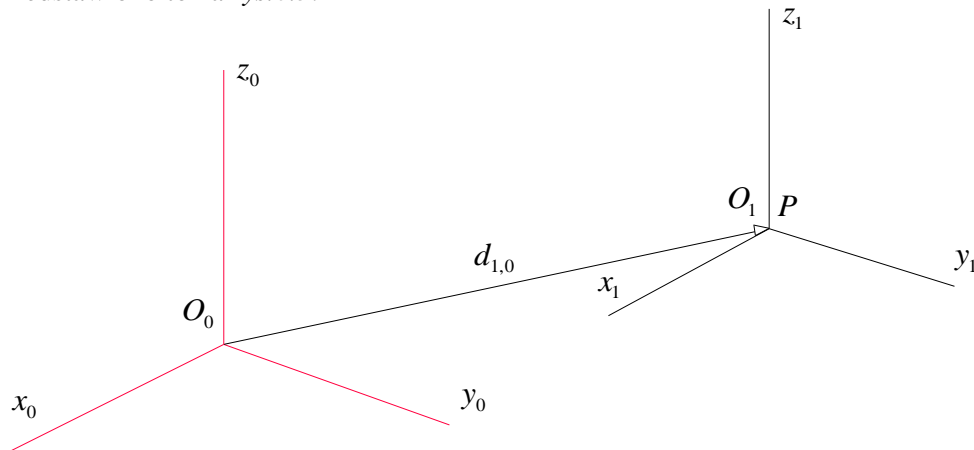
Natomiast, gdy drugi obrót ma być wykonany względem układu ustalonego, należy dokonać mnożenia lewostronnie macierzy $R_{1,0}$ z $R_{2,1}$ w wyniku takiej operacji otrzymano:

$$R_{2,0} = R_{2,1} R_{1,0}$$

Macierz $R_{2,0}$ reprezentuje zawsze przekształcenie między układami $O x_0 y_0 z_0$ i $O x_2 y_2 z_2$.

6.3. Przekształcenia jednorodne

Oprócz bardzo istotnych operacji związanych z obrotami nasuwa się pytanie jak opisać przesunięcia pomiędzy poszczególnymi układami. Poniżej przedstawiono następującą sytuację, ustalono układ współrzędnych $O x_0 y_0 z_0$, a następnie dokonano jego przesunięcia równoległego, wraz z punktem P , o odległość $|d_{1,0}|$, tak jak przedstawiono to na rys.6.5.



Rys.6.5. Układ przesunięty

Wektory jednostkowe $i_0 j_0 k_0$ są odpowiednio równoległe do wektorów $i_1 j_1 k_1$, natomiast wektor $d_{1,2}$ jest wektorem o początku w punkcie O_0 , a końcu w punkcie O_1 wyrażonym w układzie współrzędnych $O x_0 y_0 z_0$.

Punkt P posiada reprezentacje r_0 i r_1 , ponieważ odpowiednie osie w tych układach współrzędnych są równoległe, wektory te powiązano zależnością:

$$r_0 = r_1 + d_{1,0} \tag{6.20}$$

Zależność (6.20) można zapisać w postaci składowych wektora p_0 następująco:

$$\begin{aligned} r_{0,x} &= r_{1,x} + d_{1,0,x} \\ r_{0,y} &= r_{1,y} + d_{1,0,y} \\ r_{0,z} &= r_{1,z} + d_{1,0,z} \end{aligned} \tag{6.21}$$

Pomiędzy układem $O x_0 y_0 z_0$ i układem $O x_1 y_1 z_1$ występuje związek, który może być wyrażony przez kombinację obrotu i przesunięcia, co określono jako ruch sztywny. Poniższe równanie jest definicją ruchu sztywnego, jeżeli macierz R jest ortogonalna.

$$r_0 = Rr_1 + d \quad (6.22)$$

Jeżeli występują dwa ruchy sztywne wtedy:

$$r_0 = R_{1,0}r_1 + d_{1,0} \quad (6.23)$$

$$r_1 = R_{2,1}r_2 + d_{2,1} \quad (6.24)$$

Podstawiając do równania (6.23), równanie (6.24) opisano trzeci ruch sztywny i otrzymano:

$$r_0 = R_{1,0}R_{2,1}r_2 + R_{1,0}d_{2,1} + d_{1,0} \quad (6.25)$$

Pomiędzy wektorami r_0 i r_2 występuje ruch sztywny, można zapisać równanie ruchu w postaci:

$$r_0 = R_{2,0}r_2 + d_{2,0} \quad (6.26)$$

Po dokonaniu porównania równań (6.25) i (6.26) otrzymano równości:

$$R_{2,0} = R_{1,0}R_{2,1} \quad (6.27)$$

$$d_{2,0} = d_{1,0} + R_{1,0}d_{2,1} \quad (6.28)$$

Analiza równa (6.27) pokazuje, że przekształcenia orientacji mogą być po prostu mnożone, a równanie (6.28) przedstawia, że wektor od początku O_0 do początku O_2 jest sumą wektorową wektora $d_{1,0}$ od O_0 do O_1 i wektora $R_{1,0}d_{2,1}$ od O_1 do O_2 wyrażonych w orientacji układu współrzędnych $O x_0 y_0 z_0$.

$$\begin{bmatrix} R_{1,0} & d_{1,0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{2,1} & d_{2,1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1,0}R_{2,1} & R_{1,0}d_{2,1} + d_{1,0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Każda z przedstawionych powyżej macierzy ma wymiar 4×4 , gdzie 0 oznacza (000), taki zapis umożliwia stwierdzenie, że ruchy sztywne mogą być reprezentowane przez zbiór macierzy o postaci:

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & d_x \\ n_y & s_y & a_y & d_y \\ n_z & s_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

orientacja ↻
pozycja ↻
perspektywa ↻
skala ↻

W przedstawionym powyżej równaniu $n=(n_x \ n_y \ n_z)^T$ jest wektorem reprezentującym kierunek osi $O_I x_I$ w układzie $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$, $s=(s_x \ s_y \ s_z)^T$ reprezentuje kierunek osi $O_I y_I$, natomiast $a=(a_x \ a_y \ a_z)^T$ reprezentuje kierunek osi $O_I z_I$. Wektor $d=(d_x \ d_y \ d_z)^T$ jest reprezentacją wektora od początku O_0 do początku O_I wyrażony w układzie $O \ x_0 \ y_0 \ z_0$. W macierzy H występują również takie wielkości jak skala i perspektywa, które w niniejszym opracowaniu zawsze będą miały przedstawioną postać. Macierz (6.30) nazwano przekształceniem jednorodnym. Ponieważ macierz R jest ortogonalna, łatwo jest pokazać, że przekształcenie odwrotne H^{-1} jest określone następująco:

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -dR^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

Ponieważ w kartezjańskim układzie współrzędnych występuje 6 stopni swobody tak, więc zbiór wszystkich podstawowych przekształceń jednorodnych definiuje 6 macierzy, które zapisano poniżej:

dla przesunięć:

$$Trans_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Trans_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Trans_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla obrotów:

$$Rot_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Rot_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

Tak, więc na podstawie macierzy (6.32) można określić położenie i orientację dowolnego układu w przestrzeni.

Przykład 6.6

Wyznaczyć macierz przekształcenia jednorodnego H , która reprezentuje obrót o kąt α wokół bieżącej osi x , następnie przesunięciem o długość b wzdłuż osi x , przesunięciem o długość d wzdłuż bieżącej osi z , oraz obrotem o kąt θ wokół bieżącej osi z .

Rozwiązanie:

Ponieważ obroty i przesunięcia są wykonywane względem bieżących osi. Tak, więc należy pomnożyć ze sobą następujące macierze:

$$H = Rot_{x,\alpha} Trans_{x,b} Trans_{z,d} Rot_{z,\theta}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & b \\ \cos(\alpha)\sin(\theta) & \cos(\alpha)\cos(\theta) & -\sin(\alpha) & -d\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha)\sin(\theta) & \sin(\alpha)\cos(\theta) & \cos(\alpha) & d\cos(\alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

W wyniku pomnożenia macierzy związanych z odpowiednimi przesunięciami i obrotami otrzymano macierz przekształcenia jednorodnego H , która pozwala określić orientację i położenie układu w przestrzeni.

6.4. Notacja Denavita-Hartenberga

Biorąc pod uwagę, iż każdy przegub ma jeden stopień swobody, działanie każdego przegubu można opisać jedną liczbą rzeczywistą: kątem obrotu w przypadku członu obrotowego lub przemieszczeniem w przypadku członu pryzmatycznego. Do opisu kinematyki robotów można wykorzystywać podejście oparte na równaniach mechaniki klasycznej, lub zastosować odpowiednią konwencję obliczeń. W robotyce bardzo często wykorzystuje się notację Denavita-Hartenberga. Podporządkowanie się tej konwencji umożliwi wyznaczenie równań kinematyki. Moż-

liwe jest dokonanie obliczeń nie przestrzegając tej konwencji, jednak w celu uproszczenia równań oraz w celu kreowania uniwersalnego języka często do opisu kinematyki wykorzystuje się tę notację. Podstawowe założenia to: robot posiada n członów ponumerowanych od 0 do n , zaczynając od podstawy robota, którą oznaczono jako człon 0 . Przeguby są ponumerowane od $1..n$, przy czym przegub i łączy człon $i-1$ z członem i . Zmienna przegubowa dla przegubu i jest oznaczona przez q_i . W przypadku przegubu obrotowego q_i reprezentuje kąt, natomiast w przypadku przegubu pryzmatycznego jest to przemieszczenie. Z każdym członem w sposób sztywny doczepia się układ współrzędnych. W podstawie dołącza się układ bazowy oznaczony numerem 0 . Następnie są wybierane układy od $1..n$ w sposób taki, iż układ i jest na sztywno związany z członem i . Oznacza to, iż przy ruchu robota współrzędne każdego punktu członu i pozostają niezmiennie.

Dokonano założenia, że A_i jest macierzą przekształcenia jednorodnego, które transformuje współrzędne punktu z układu i do układu $i-1$. Macierz A_i nie posiada stałych wartości, lecz zmienia się wraz ze zmianą konfiguracji robota w przestrzeni. Dokonując założenia, że wszystkie przeguby są obrotowe lub pryzmatyczne oznacza to, iż A_i jest funkcją tylko jednej zmiennej q_i .

Taka konwencja powoduje, iż każde jednorodne przekształcenie A_i jest reprezentowane przez cztery przekształcenia podstawowe:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (6.33)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Podstawowe cztery wielkości θ_i , a_i , d_i , α_i są parametrami członu i oraz przegubu i .

Podstawowe parametry w równaniu (6.33) nazwano odpowiednio:

a_i	–	długość członu
α_i	–	skręcenie członu
d_i	–	odsunięcie przegubu
θ_i	–	kąt przegubu

Ponieważ macierz A_i jest funkcją jednej zmiennej, wynika z tego, iż trzy z powyższych czterech wielkości są dla danego członu stałe, a czwarty parametr θ_i dla przegubu obrotowego i d_i dla przegubu pryzmatycznego jest wielkością zmienną. W notacji Denavita-Hartenberga są cztery parametry, ilość parametrów wynika z dobrania położenia początku układu oraz jego osi i tak, oś z jest uprzywilejowana i opisuje ruch przegubu natomiast oś x umożliwia odpowiednie ustawienie układów współrzędnych związanych z poszczególnymi członami. Oś y nie jest wykorzystywana w opisanej notacji, a jej ustawienie jest wypadkową ustawienia osi z i x . Je-

dyne założenie związane z układem współrzędnych to przyjmowanie zawsze prawoskrętnego układu współrzędnych.

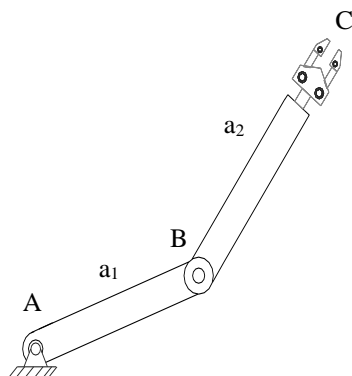
6.5. Kinematyka prosta

Do opisu kinematyki prostej niezbędne jest podanie równań kinematyki robota. Zadanie kinematyki prostej można określić następująco: posiadając dane o zmiennych przegubowych należy określić pozycję i orientację końcówki roboczej.

Jak wspomniano wcześniej równania kinematyki mogą zostać wyznaczone wykorzystując metody stosowane w mechanice klasycznej lub wykorzystując notację Denavita-Hartenberga. Poniżej przedstawiono kilka przykładów, w których dokonano analizy zadania prostego kinematyki.

Przykład 6.7

Wyznaczyć położenie chwytaka w przestrzeni dla manipulatora 2-członowego przedstawionego na rys.6.6. Poszczególne człony wykonują ruch w płaszczyźnie płaskiej. Dana jest długość członów manipulatora oznaczona przez a_1 i a_2 (długość a_2 jest liczona od punktu B do C).

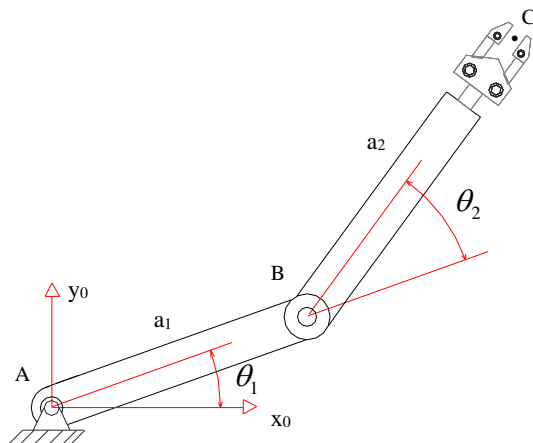


Rys.6.6. Manipulator 2-członowy

Rozwiązanie:

I sposób

Dla prostego manipulatora płaskiego można w sposób klasyczny wyznaczyć położenie punktu C . Przyjęto układ współrzędnych względem, którego odbywa się ruch członów tak jak przedstawia to rys.6.7.



Rys.6.7. Manipulator 2-członowy z przyjętym układem współrzędnych

Obliczenie położenia chwytaka:

Przyjęto stały układ, nazywany układem bazowym lub odniesienia, względem, którego rozpatruje się wszystkie obiekty łącznie z manipulatorem. Układ ten został zaczepiony w punkcie $O_0x_0y_0$ leżącym w podstawie robota. Współrzędne x_0, y_0 narzędzia w tym układzie współrzędnych są wyrażone wzorami (rzutowanie punktu C na poszczególne osie):

$$x_0 = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

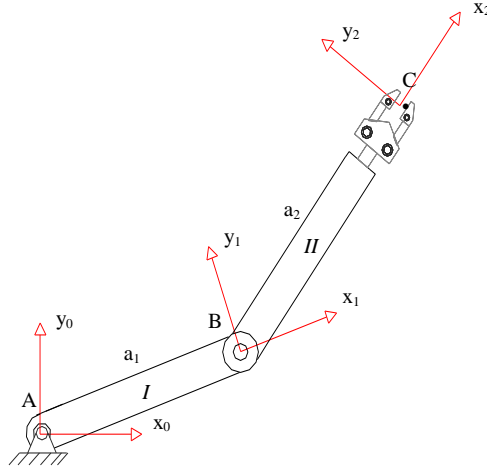
$$y_0 = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

W przypadku prostych manipulatorów takie podejście do rozwiązania tego typu zadań jest wygodne, jednak w przypadku bardziej złożonych struktur, może okazać się trudne do zastosowania.

II sposób

Innym sposobem rozwiązania tego zadania jest zastosowanie notacji Denavita-Hartenberga. W tym celu należy również przyjąć bazowy układ współrzędnych x_0, y_0 oraz układy współrzędnych związane z każdym członem. Dodatkowo należy zachować zasadę, iż obrót poszczególnego członu odbywa się względem osi z (ponieważ analizowany manipulator pracuje tylko w jednej płaszczyźnie nie zaznaczono osi z), a przemieszczenia względem osi z i x . Sposób przyjęcia tych układów przedstawiono na rys.6.8.

Należy wspomnieć, iż wszelkie obliczenia związane z konstruowaniem i analizą kinematyki wykonuje się przy użyciu pakietów obliczeniowych takich jak np. Maple™, Matlab™.



Rys.6.8. Manipulator 2-członowy z przyjętymi układami współrzędnych zgodnie z notacją Denavita-Hartenberga

Pierwszy krok, jaki należy wykonać zgodnie z notacją to przyjęcie układów współrzędnych związanych z każdym członem oraz przygotowanie tabeli (tab.6.1) z parametrami kinematycznymi, takimi jak kąty obrotu, przemieszczenia członów oraz długości poszczególnych ramion. Dodatkowo przy tych parametrach, które ulegają zmianie znajduje się indeks *var* oznaczający, iż ten parametr jest zmienny w czasie.

Tabela 6.1. Parametry kinematyczne dla przykładu 6.7

układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_{1,var}$	0	a_1	0
2	$\theta_{2,var}$	0	a_2	0

Analizowany płaski manipulator oczywiście posiada 2 stopnie swobody, co można łatwo określić na podstawie tab.6.1. Zawsze należy tak wiązać układy współrzędnych, aby w każdym przekształceniu jednorodnym występował tylko jeden parametr zmienny.

Następnym krokiem jest zapisanie macierzy przekształcenia jednorodnego dla poszczególnych członów na podstawie równania (6.33) w oparciu o dane zawarte w tab.6.1.

dla układu I

$$A_1 = Rot_{z,\theta_1} \cdot Trans_{x,a_1}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & a_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & a_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu II

$$A_2 = Rot_{z, \theta_2} \cdot Trans_{x, a_2}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

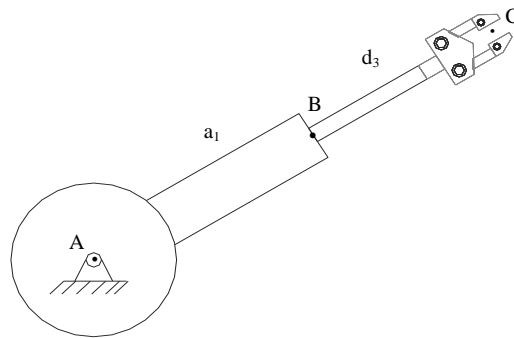
Końcowym etapem rozwiązania tego typu zadania jest podanie macierzy transformacji układu ostatniego do układu $O_0 x_0 y_0$, którą zapisano następująco:

$$T_{2,0} = A_1 \cdot A_2$$

$$T_{2,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Przykład 6.8

Wyznaczyć położenie chwytaka w przestrzeni dla manipulatora 2-członowego przedstawionego na rys.6.9. Poszczególne człony wykonują ruch w płaszczyźnie płaskiej (pierwszy ruch jest obrotowy, natomiast drugi postępowy). Dana jest długość członów manipulatora oznaczona przez a_1 i d_3 (długość d_3 jest liczona od punktu B do C).



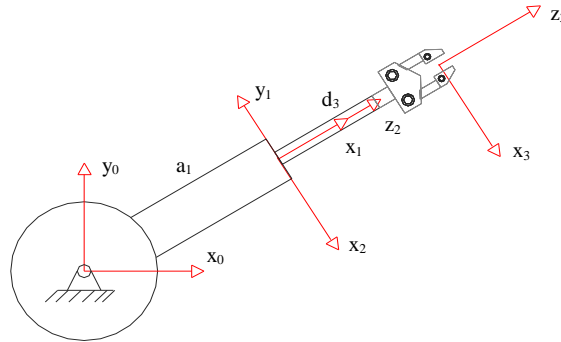
Rys.6.9. Manipulator 2-członowy

Rozwiązanie:

Wykorzystując notacje Denavita-Hartenberga dąży się do takiego ustawienia współrzędnych, aby ruch poszczególnych członów odbywał się zawsze względem osi z. Zgodnie z opisaną notacją w jednym przekształceniu jednorodnym można wykonywać obroty i przesunięcia zgodnie z równaniem (6.33) w kolejności takiej jak zostały zapisane poszczególne macierze w tym równaniu. Bardzo często w jed-

nym przekształceniu nie da się odpowiednio zorientować układu współrzędnych tak, aby oś z była w osi ruchu. Należy wtedy przyjąć następny układ odpowiednio zorientowany względem poprzedniego.

Na rys.6.10 przedstawiono analizowany manipulator z przyjętymi układami współrzędnych



Rys.6.10. Manipulator 2-członowy z przyjętymi układami współrzędnych zgodnie z notacją Denavita-Hartenberga

Tabela 6.2. Parametry kinematyczne dla przykładu 6.8

układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_{1,var}$	0	a_1	0
2	-90	0	0	-90
3	0	$d_{3,var}$	0	0

Znaki minus w tab.6.2 przy kątach 90° wynika z reguły śruby prawoskrętnej.
dla układu I

$$A_1 = Rot_{z,\theta_1} \cdot Trans_{x,a_1}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & a_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & a_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu II

$$A_2 = Rot_{z,-90} \cdot Rot_{x,-90}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 & 0 \\ \sin(-90) & \cos(-90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu III

$$A_3 = Trans_{z,d_3}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

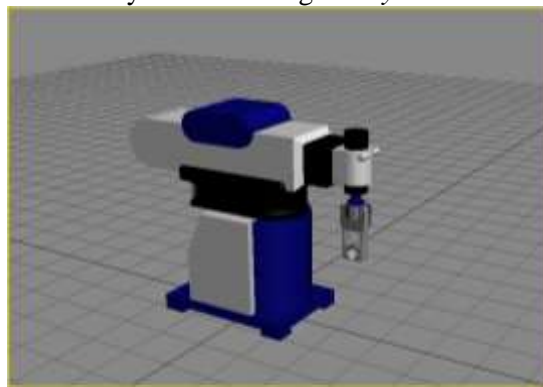
Macierz transformacji układu $T_{3,0}$ ma postać:

$$T_{3,0} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & (a_1 + d_3) \cos \theta_1 \\ -\cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & (a_1 + d_3) \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Zgodnie z równaniem (6.30) w powyższej macierzy można wyróżnić orientację i pozycję chwytaka.

Przykład 6.9

Wyznaczyć orientację i położenie końcówki w przestrzeni dla manipulatora o czterech stopniach swobody zilustrowanego na rys.6.11.



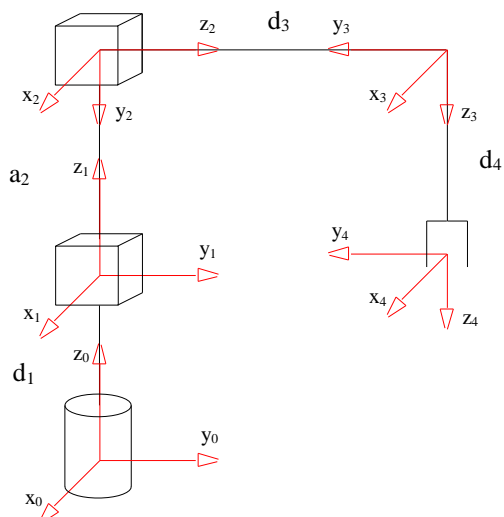
Rys.6.11. Manipulator o konfiguracji cylindrycznej

Dane są długości poszczególnych członów manipulatora odpowiednio: d_1 , a_2 , d_3 , d_4 , mierząc od podstawy.

Rozwiązanie:

Podstawową sprawą przy rozwiązywaniu tego typu zadań z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga jest odpowiednie przemyślenie, a następnie przyjęcie układów współrzędnych związanych z poszczególnymi członami. Należy podkreślić, iż bardzo często istnieje wiele sposobów orientowania układów współrzędnych (zgodnie z notacją Denavita-Hartenberga), jednak celem analizy kinematyki prostej jest przyjęcie najprostszej formy opisu ze względu na zmniejszenie komplikacji związanych z obliczeniami.

W przypadku przedstawionej struktury manipulatora najprostszym sposobem przyjęcie układów współrzędnych został przedstawiony na rys.6.12.

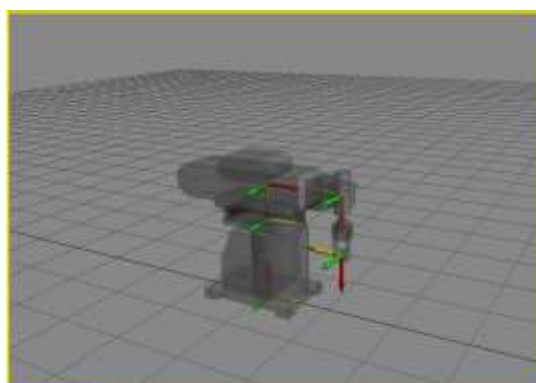


Rys.6.12. Schemat manipulator z przyjętymi układami współrzędnych

Przyjęte układy współrzędnych zostały również przedstawione na trójwymiarowym modelu manipulatora, zilustrowanym na rys.6.13. W celu oznaczenia poszczególnych osi wykorzystano odpowiednie oznaczenie ich kolorami: czerwony – oś z, zielony – oś x oraz żółty – oś y.

Tabela 6.3. Parametry kinematyczne dla przykładu 6.9

układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_{1,var}$	d_1	0	0
2	0	$d_{2,var}$	0	-90
3	0	$d_{3,var}$	0	-90
4	$\theta_{4,var}$	d_4	0	0



Rys.6.13. Trójwymiarowy widok manipulatora z układami współrzędnych

dla układu I

$$A_1 = Rot_{z,\theta_1} \cdot Trans_{z,d_1}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu II

$$A_2 = Trans_{z,d_2} \cdot Rot_{x,-90}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu III

$$A_3 = Trans_{z,d_3} \cdot Rot_{x,-90}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu IV

$$A_4 = Rot_{z,\theta_4} \cdot Trans_{z,d_4}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

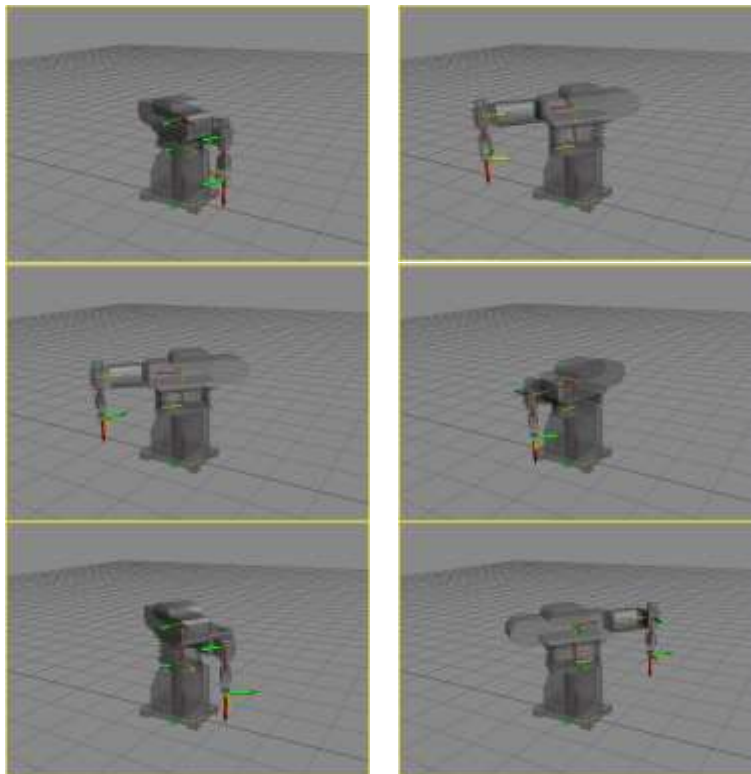
tak więc:

$$T_{4,0} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4$$

$$T_{4,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4 - \theta_1) & -\sin(\theta_4 - \theta_1) & 0 & -d_3 \sin(\theta_1) \\ -\sin(\theta_4 - \theta_1) & -\cos(\theta_4 - \theta_1) & 0 & d_3 \cos(\theta_1) \\ 0 & 0 & -1 & d_1 + d_2 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

W celu bliższego (bardziej intuicyjnego) przedstawienia zagadnienia związanego z modelowaniem kinematyki z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga dokonano symulacje komputerową ruchów manipulatora, w *tab.6.4* przedstawiono kilka charakterystycznych ujęć przedstawiających sposób przemieszczania się układów.

Tabela 6.4. Trójwymiarowe ujęcia podczas ruchu manipulatora



Posiadając macierz transformacji $T_{4,0}$ dla analizowanego manipulatora w postaci symbolicznej można podstawiając wartości parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych wyznaczyć położenie i orientację manipulatora w danej chwili czasowej.

Przykład 6.10

Wyznaczyć orientację i położenie końcówki w przestrzeni dla manipulatora o czterech stopniach swobody zilustrowanego na rys.6.14.

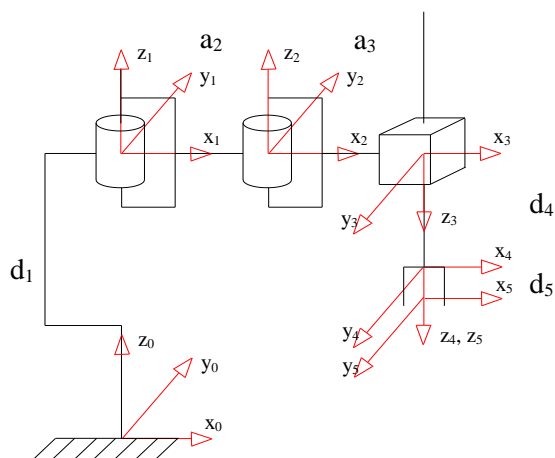


Rys.6.14. Manipulator o konfiguracji SCARA

Dane są długości poszczególnych członów manipulatora odpowiednio: d_1 , a_2 , d_3 , d_4 , mierząc od podstawy.

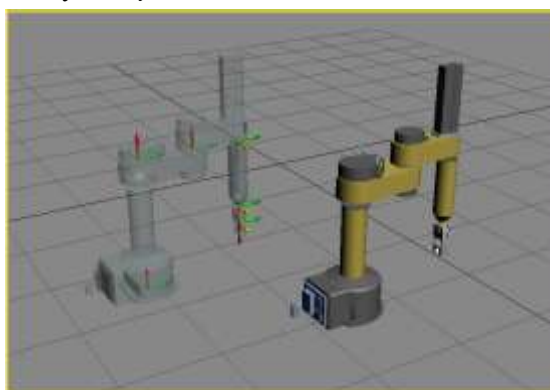
Rozwiązanie:

Pierwszym krokiem jest przyjęcie układów współrzędnych przedstawione na rys.6.15.



Rys.6.15. Schemat manipulatora z przyjętymi układami współrzędnych

Układy współrzędnych zostały również przedstawione na trójwymiarowym modelu manipulatora, zilustrowanym na rys.6.16. W celu oznaczenia poszczególnych osi wykorzystano odpowiednie oznaczenie ich kolorami: czerwony – oś z, zielony – oś x oraz żółty – oś y.



Rys.6.16. Trójwymiarowy widok manipulatora z układami współrzędnych

Tabela 6.5. Parametry kinematyczne dla przykładu 6.10

układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	d_1	0	0
2	$\theta_{2,var}$	0	a_2	0
3	$\theta_{3,var}$	0	a_3	180
4	0	$d_{4,var}$	0	0
5	$\theta_{5,var}$	d_5	0	0

dla układu I

$$A_1 = Trans_{z,d_1}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu II

$$A_2 = Rot_{z,\theta_2} \cdot Trans_{x,a_2}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu III

$$A_3 = Rot_{z,\theta_3} \cdot Trans_{x,a_3} \cdot Rot_{x,180}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(180) & -\sin(180) & 0 \\ 0 & \sin(180) & \cos(180) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & 0 & a_3 \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & -\cos(\theta_3) & 0 & a_3 \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu IV

$$A_4 = Trans_{z,d_4}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dla układu V

$$A_5 = Rot_{z,\theta_5} \cdot Trans_{z,d_5}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ostatecznie:

$$T_{5,0} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5$$

$$T_{5,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & 0 & a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & -\cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & 0 & a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_4 - d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Otrzymana macierz może posłużyć do obliczenia pozycji i orientacji w dowolnej chwili czasowej.

Zadanie 6.4

Wyznaczyć pozycję i orientację chwytaka względem podstawy dla manipulatora o konfiguracji kartezjańskiej.

Zadanie 6.5

Wyznaczyć pozycję i orientację chwytaka względem podstawy dla manipulatora o konfiguracji antropomorficznej.

6.6. Kinematyka odwrotna

W kinematyce prostej pokazano jak określać pozycję i orientację końcówki roboczej w zależności od zmiennych przegubowych. Natomiast kinematyka odwrotna polega na znalezieniu zmiennych przegubowych w zależności od pozycji i orientacji końcówki roboczej. W ogólnym przypadku jest ono trudniejsze niż zadanie kinematyki prostej, ponieważ czasami nie istnieje jednoznaczne rozwiązanie wynikające z nieliniowości równań kinematyki. Problem kinematyki odwrotnej można przedstawić następująco. Dana jest jednorodna macierz przekształcenia w postaci 4×4 (6.30):

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

należy znaleźć (jedno lub wszystkie) rozwiązania równania:

$$T_{n,0}(q_1, \dots, q_n) = H \quad (6.35)$$

gdzie

$$T_{n,0}(q_1, \dots, q_n) = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \quad (6.36)$$

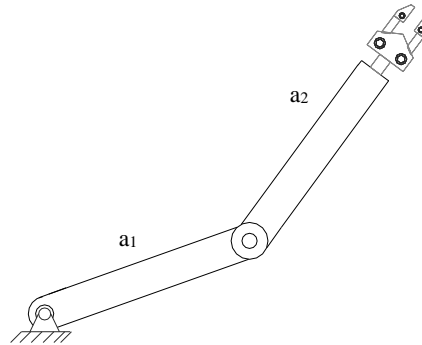
Równanie (6.35) daje 12 nieliniowych równań z n niewiadomymi, które mogą być zapisane jako:

$$T_{i,j}(q_1, \dots, q_n) = h_{ij} \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (6.37)$$

gdzie T_{ij} , h_{ij} oznaczają 12 nieliniowych elementów macierzy, odpowiednio $T_{n,0}$ i H . Ponieważ dolne wiersze obu macierzy $T_{n,0}$ i H wynoszą $(0,0,0,1)$, więc spośród 16 równań reprezentowanych przez zależność (6.35) cztery są bardzo proste do rozwiązania.

Przykład 6.11

Wyznaczyć współrzędne konfiguracyjne poszczególnych członów dla manipulatora 2-członowego przedstawionego na rys.6.17. Poszczególne człony wykonują ruch w płaszczyźnie płaskiej. Dana jest długość członów manipulatora tak jak w przykładzie 6.7.

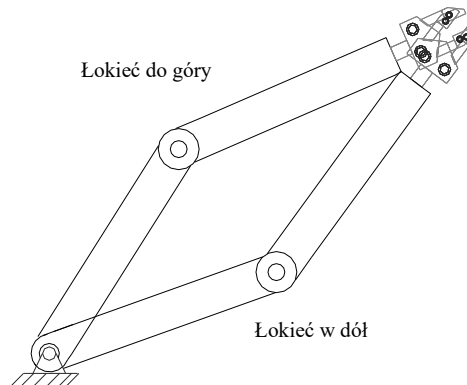


Rys.6.17 Manipulator 2-członowy

Rozwiązanie:

Rozwiązanie kinematyki odwrotnej może się odbywać dla zapisu macierzowego lub w sposób klasyczny, co przedstawiono poniżej.

Równania kinematyki odwrotnej są nieliniowe, co powoduje, że równania nie są proste a czasami nie istnieje jednoznaczne rozwiązanie. Na przykład w przypadku dwuczłonowego mechanizmu płaskiego może nie być w ogóle rozwiązania, gdy współrzędne (x,y) są poza zasięgiem manipulatora. Może istnieć jedno rozwiązanie, jeśli manipulator musi być całkowicie wyciągnięty aby osiągnąć zadany punkt.



Rys.6.18. Rozwiązanie niejednoznaczne

Gdy współrzędne (x,y) mieszczą się w zasięgu manipulatora, mogą istnieć dwa rozwiązania, jak to pokazano na rys.6.18, konfiguracje „łokieć do góry” i „łokieć w dół”. W końcu może istnieć taki punkt w przestrzeni roboczej dla osiągnięcia, którego może istnieć nieskończenie wiele możliwych ustawień manipulatora.

Biorąc pod uwagę rys.6.7 można stwierdzić, iż stosując równania cosinusów, kąt θ_2 jest opisany wzorem:

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}$$

Teraz θ_2 można przedstawić w postaci:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right)$$

Lepszym jednak sposobem na znalezienie kąta θ_2 jest wykorzystanie przekształconych równań kinematyki prostej:

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right)^2}$$

skąd można wyznaczyć:

$$\theta_2 = \arctg \frac{\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right)^2}}{\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}}$$

zaletą tego podejścia jest zróżnicowanie obu konfiguracji „łokiec do góry” i „łokiec w dół”, przez wybór odpowiedniego znaku w ostatnim równaniu. Dalej przekształcając dochodzi się do równania:

$$\theta_1 = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{a_2 \sin \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2}\right)$$

Można zauważyć, że kąt θ_2 zależy od kąta θ_1 . Ma to znaczenie fizyczne, gdyż oczekujemy różnych wartości kąta θ_1 w zależności od tego, które rozwiązanie wybierzemy dla kąta θ_2 .

Przykład 6.12

Dla manipulatora SCARA z przykładu 6.10 otrzymano pozycję i orientację ostatniego układu współrzędnych w postaci:

$$H = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & d_x \\ n_y & s_y & a_y & d_y \\ n_z & s_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rozwiązać zadanie odwrotne kinematyki.

Rozwiązanie:

Ponieważ znana jest macierz transformacji układu $T_{4,0}$ dla manipulatora o strukturze SCARA z przykładu 6.10 w postaci:

$$T_{5,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & 0 & a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & -\cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & 0 & a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_4 - d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

tak, więc w celu znalezienia zmiennych przegubowych θ_2 , θ_3 , d_4 , θ_5 , należy rozwiązać następujący układ nieliniowych równań trygonometrycznych:

$$\begin{cases} n_x = \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) \\ n_y = \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) \\ n_z = 0 \\ s_x = \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) \\ s_y = -\cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) \\ s_z = 0 \\ a_x = 0 \\ a_y = 0 \\ a_z = -1 \\ d_x = a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ d_y = a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ d_z = d_1 - d_4 - d_5 \end{cases}$$

W opisanym przypadku dodatkowo 6 równań jest prostych, wynika to z faktu, iż rozpatrywany model manipulatora posiadał tylko 4 stopnie swobody. Oczywiście w celu rozwiązania tego zadania wystarczy wybrać 4 równania z poszukiwanymi zmiennymi. Dla manipulatorów o większej liczbie stopni swobody stopień komplikacji obliczeń wzrasta znacząco. Równania te są na ogół zbyt skomplikowane, aby rozwiązać je wprost, otrzymując wyniki w postaci zamkniętych, analitycznych wzorów.

7. DYNAMIKA ROBOTÓW

W poprzednim rozdziale rozważania koncentrowały się wyłącznie na zagadnieniach związanych z kinematyką, rozpatrywano położenia i orientację, jednak nie rozważano sił potrzebnych do wywołania ruchu. W dynamice rozpatruje się równania ruchu, które opisują ruch manipulatora związanego z siłami i momentami napędowymi lub siłami zewnętrznymi przyłożonymi do manipulatora.

W analizie dynamiki manipulatorów rozpatruje się dwa zadania. W zadaniu odwrotnym dynamiki dane są punkty trajektorii ruchu, prędkości oraz przyspieszenia, a wyznacza się wektory sił i momentów napędowych τ . Takie zadanie występuje przy sterowaniu ruchem manipulatora. Zadanie proste dynamiki polega na wyznaczeniu ruchu manipulatora będącego pod działaniem sił i momentów napędowych, tzn. dany jest wektor τ , a należy wyznaczyć położenie, prędkości i przyspieszenia.

Dynamiczne właściwości manipulatora są wyrażone jako zmiany położenia w czasie w zależności od sił i momentów napędowych. Zależności te mogą być opisane przez układ równań różniczkowych ruchu. W tym celu stosuje się różne formalizmy matematyczne jednym z nich jest metoda Lagrange'a. Otrzymane tą metodą równania opisują właściwości dynamiczne układu w zależności od energii kinetycznej i potencjalnej, wyrażonych w funkcji współrzędnych konfiguracyjnych.

7.1. Równania Lagrange'a II rodzaju

Pierwszym krokiem w kierunku zapisu równań dynamiki jest przyjęcie współrzędnych uogólnionych $q_1..q_n$, które w pełni określają położenie układu, a E i V określono jako całkowitą energię kinetyczną i potencjalną układu. Następnie wprowadzono pojęcie funkcji Lagrange'a (potencjału kinetycznego) w postaci:

$$L(q_j, \dot{q}_j) = E - V \quad (7.1)$$

Postać dynamicznych równań ruchu zapisano następująco:

$$\left[\frac{d}{dt} \right] \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_j} \right) = Q_j \quad j = 1..n \quad (7.2)$$

gdzie Q_j to uogólniona siła odpowiadająca uogólnionemu przemieszczeniu q_j . Siła ta może być określona przez wyznaczenie pracy przygotowanej wykonanej przez siły czynne (niezachowawcze) działające na układ.

Energię kinetyczną członu „i” opisano następującym wyrażeniem:

$$E_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} J_i \omega_i^2 \quad (7.3)$$

gdzie m_i - masa członu, v_i - prędkość liniowa członu, ω_i - prędkość kątowa członu, J_i - moment bezwładności, określony względem prostej przechodzącej przez środek masy i wyrażony w układzie podstawy. Pierwszy składnik wzoru (7.3) oznacza

energię kinetyczną ruchu postępowego z prędkością środka masy, a drugi - energię kinetyczną ruchu obrotowego. Wzór (7.3) obowiązuje, gdy człon i wykonuje ruch postępowy i obrotowy w innym przypadku należy go odpowiednio zmodyfikować.

Całkowita energia kinetyczna manipulatora jest sumą energii kinetycznych poszczególnych członów:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (7.4)$$

Energię potencjalną członu „ i ” zapisano następująco:

$$V_i = m_i g h_i \quad (7.5)$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie, h_i – wysokość od zerowego poziomu odniesienia energii potencjalnej.

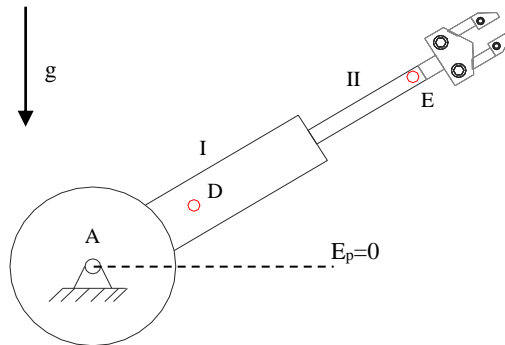
Analogicznie całkowita energia potencjalna manipulatora jest sumą energii potencjalnej poszczególnych członów:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (7.6)$$

Do sił uogólnionych Q_i zalicza się wszystkie siły i momenty działające na człony, z wyjątkiem sił ciężkości i bezwładności. Przyjęto, że w połączeniach ruchomych działają siły i momenty napędowe $\tau = \tau_1.. \tau_n$, a zewnętrzne siły czynne działają na człon roboczy. Siła uogólniona może być wyznaczona przez obliczenia pracy przygotowanej wykonanej przez te siły.

Przykład 7.1

Wyznaczyć dynamiczne równania ruchu dla manipulatora o dwóch stopniach swobody zilustrowanego na rys.7.1, jeżeli dane są momenty bezwładności J_1 i J_2 względem osi przechodzącej przez środek ciężkości poszczególnych elementów, masy m_1, m_2 oraz stała odległość pomiędzy punktami A i D (oznaczona jako l_1).



Rys. 7.1. Manipulator płaski dwuczłonowy

Rozwiązanie:

Pierwszym krokiem w zapisie dynamicznych równań ruchu jest przyjęcie współrzędnych jednorodnych, ponieważ analizowany manipulator może się obracać względem punktu A tak więc pierwszą współrzędną będzie kąt obrotu θ_1 . Manipulator może również wysuwać drugi człon (ruch postępowy) na odległość λ_2

(odległość pomiędzy punktami A i E na rys.7.1). Odległość ta jest zmienna w czasie, co oznacza, iż drugą współrzędną uogólnioną będzie właśnie λ_2 .

Wyznaczenie energii kinetycznej członu I:

$$E_1 = \frac{1}{2} J_{1z} \dot{\theta}_1^2 = \frac{1}{2} (J_1 + m_1 l_1^2) \dot{\theta}_1^2 \quad [J]$$

Wyznaczenie energii kinetycznej członu II:

$$E_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \lambda_2^2 = \frac{1}{2} (J_2 + m_2 \lambda_2^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{\lambda}_2^2 \quad [J]$$

gdzie J_{1z} i J_{2z} to zastępcze momenty bezwładności liczone względem osi obrotu manipulatora.

Całkowita energia kinetyczna:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{1}{2} (J_1 + m_1 l_1^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} (J_2 + m_2 \lambda_2^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{\lambda}_2^2 \quad [J]$$

Wyznaczenie energii potencjalnej członu I:

$$V_1 = m_1 g h_1 = m_1 g l_1 \sin(\theta_1) \quad [J]$$

Wyznaczenie energii potencjalnej członu II:

$$V_2 = m_2 g h_2 = m_2 g \lambda_2 \sin(\theta_1) \quad [J]$$

gdzie g to przyspieszenie ziemskie.

Całkowita energia potencjalna:

$$V = V_1 + V_2 = (m_1 l_1 + m_2 \lambda_2) g \sin(\theta_1) \quad [J]$$

Zapisanie funkcji Lagrange'a zgodnie ze wzorem (7.1):

$$L = E - V = \frac{1}{2} (J_1 + m_1 l_1^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} (J_2 + m_2 \lambda_2^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{\lambda}_2^2 - (m_1 l_1 + m_2 \lambda_2) g \sin(\theta_1) \quad [J]$$

Wyznaczenie odpowiednich pochodnych zgodnie ze wzorem (7.2):

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 l_1 + m_2 \lambda_2) g \cos(\theta_1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = m_2 (\lambda_2 \dot{\theta}_1^2 - g \sin(\theta_1))$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (J_1 + m_1 l_1^2) \dot{\theta}_1 + (J_2 + m_2 \lambda_2^2) \dot{\theta}_1$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_2} = m_2 \dot{\lambda}_2$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right] = 2m_2 \lambda_2 \dot{\lambda}_2 \dot{\theta}_1 + (J_1 + J_2 + m_1 l_1^2 + m_2 \lambda_2^2) \ddot{\theta}_1$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_2} \right] = m_2 \ddot{\lambda}_2$$

Zapisanie równań Lagrange'a dla analizowanego manipulatora zgodnie ze wzorem (7.2):

$$2m_2 \lambda_2 \ddot{\lambda}_2 \dot{\theta}_1 + (J_1 + J_2 + m_1 l_1^2 + m_2 \lambda_2^2) \ddot{\theta}_1 + (m_1 l_1 + m_2 \lambda_2) g \cos(\theta_1) = \tau_1 \text{ [Nm]}$$

$$m_2 \ddot{\lambda}_2 - m_2 \lambda_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 g \sin(\theta_1) = \tau_2 \text{ [N]}$$

Powyższe dynamiczne równania ruchu umożliwiają analizę zadania prostego i odwrotnego dynamiki. Należy zauważyć, iż z pierwszego równania otrzymano matematyczny opis momentu, jaki należy przyłożyć do członu I, natomiast z drugiego równania otrzymano opis siły, jaką należy zastosować dla członu II.

Zadanie 7.1

Wyznaczyć dynamiczne równania ruchu dla manipulatora z przykładu 6.7 mając dane: – długości ramion a_1, a_2

- momenty bezwładności względem prostej przechodzącej przez środek ciężkości odpowiedniego członu J_1, J_2
- masy poszczególnych członów m_1, m_2

Zadanie 7.2

Wyznaczyć dynamiczne równania ruchu dla płaskiego manipulatora z trzema ramionami (wszystkie pary kinematyczne klasy V obrotowe) mając dane:

- długości ramion a_1, a_2, a_3
- momenty bezwładności względem prostej przechodzącej przez środek ciężkości odpowiedniego członu J_1, J_2, J_3
- masy poszczególnych członów m_1, m_2, m_3

7.2. Równania Newtona-Eulera

W formalizmie Newtona-Eulera odwrotnie jak w formalizmie Lagrange'a manipulator traktuje się nie jako całość, lecz każdy człon jest traktowany oddzielnie i zapisywane są równania opisujące jego ruch postępowy i obrotowy. Ponieważ każdy człon jest połączony z innymi członami, równania opisujące ten człon zawierają sprzężenia od sił i momentów, które pojawiają się także w równaniach opisujących sąsiednie człony. Siłę F , działającą w środku masy ciała i wywołującą ruch z przyspieszeniem v_s określono przez równanie Newtona:

$$F = m \ddot{x}_s \tag{7.7}$$

Moment M , który musi być wywierany na ciało, aby wywołać ruch obrotowy z przyspieszeniem kątowym ω , jest dany przez równanie Eulera:

$$M = S_I \ddot{\omega} + \omega \times S_I \omega \tag{7.8}$$

gdzie S_I oznacza tensor bezwładności ciała, określony w układzie $\{S\}$ o początku w środku masy ciała.

Po obliczeniu przyspieszenia środka masy oraz prędkości i przyspieszenia kąto-
wego członu, określonego w układzie tego członu, można według równań (7.7) i (7.8)
obliczyć siłę i moment bezwładności. Następnie należy obliczyć siły i momenty
napędowe w połączeniach ruchowych. Można to uczynić pisząc równania równo-
wagi sił i momentów działających na każdy wydzielony człon, uzupełnione o siły i
momenty bezwładności. Ponieważ siły i momenty bezwładności są określone w
układzie związanym z członem, to również siły i momenty oddziaływań członów
sąsiadujących powinny być określone w tym samym układzie.

Siłę grawitacji można uwzględnić wprowadzając do równań zależność gdzie g jest
wektorem przyspieszenia grawitacji, a dodatkowo zdefiniowane przyspieszenie jest
fikcyjnym przyspieszeniem podstawy w kierunku pionowym do góry, które powo-
duje taki sam skutek, jak efekt sił ciężkości. W ten sposób bez dodatkowych opera-
cji obliczeniowych uwzględniono efekt ciężenia w siłach bezwładności członów.

Równania równowagi sił i momentów działających na człon „ i ” zapisane w ukła-
dzie tego członu określono następująco:

$$F_i = R_{i-1,i} - B_{i+1,i} R_{i+1,i} \quad (7.9)$$

$$M_i = M_{i-1,i} - B_{i+1,i} M_{i+1,i} - r_{S_i} \times F_i - p_{i+1,i} \times B_{i+1,i} R_{i+1,i} \quad (7.10)$$

gdzie:

$B_{i+1,i}$ - macierz obrotu układu „ $i+1$ ” względem układu „ i ”

r_{S_i} - wektor położenia środka masy S_i członu „ i ” względem początku układu „ i ”

$p_{i+1,i}$ - wektor położenia O_{i+1} początku układu „ $i+1$ ” względem O_i - początku ukła-
du „ i ”

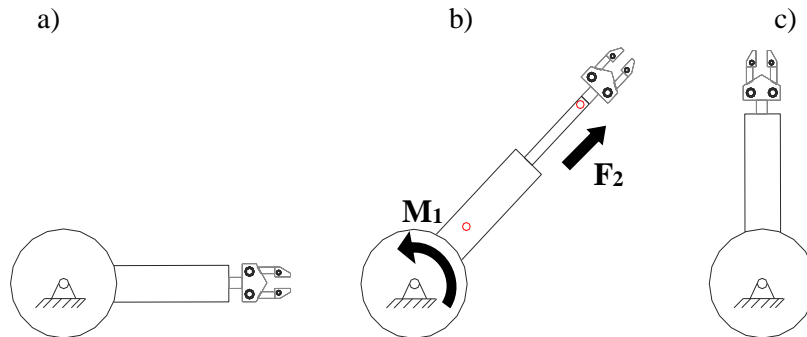
$R_{i+1,i}$, $M_{i+1,i}$ - siła i moment oddziaływania członu „ $i+1$ ” na człon „ i ”

7.3. Dynamika odwrotna

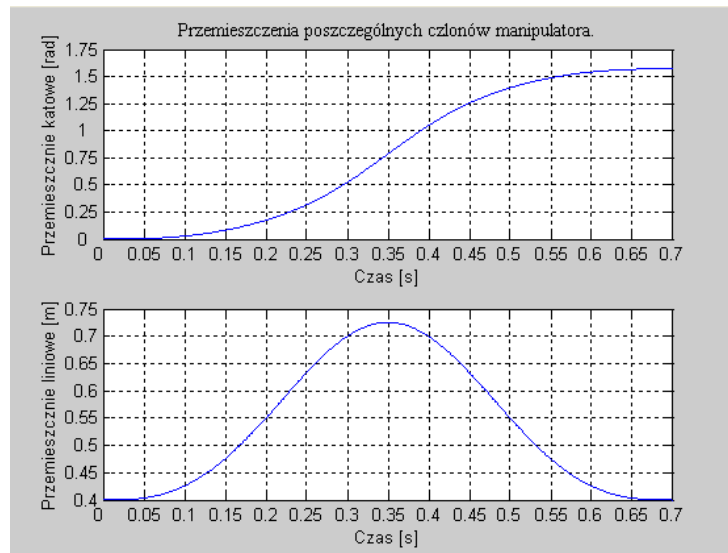
W zadaniu odwrotnym dynamiki znane jest przemieszczenie, prędkości oraz
przyspieszenia, a należy wyznaczyć wektor sił i momentów napędowych τ .

Przykład 7.2

Rozwiązać zadanie odwrotnego dynamiki, czyli wyznaczyć siły i momenty
działające na dwuczłonowy manipulator z przykładu 6.1, mając następujące dane:
masa członu I $m_1=3$ [kg], długość członu I $l_1=0.2$ [m], moment bezwładności I czło-
nu $J_1=0.38$ [kg·m²], masa członu II $m_2=1.5$ [kg], moment bezwładności II członu
 $J_2=0.1$ [kg·m²] oraz przyspieszenie ziemskie $g=9.81$ [m/s²]. Wiadomo, iż manipula-
tor w chwili początkowej pozostawał w spoczynku (rys.7.2a) a następnie obrócił
się o 90° z pozycji poziomej do pozycji pionowej (rys.7.2c), jednocześnie drugi
człon wykonał ruch posuwisto zwrotny o 0.325[m] (rys.7.2b). Całkowity czas ru-
chu manipulatora wyniósł $t=0.7$ [s].



Rys.7.2. Początkowy, środkowy oraz końcowy układ członów



Rys.7.3. Przebiegi czasowe przemieszczenia kątownego członu I i przemieszczenia liniowego członu II

Znane są również przebiegi czasowe przemieszczenia liniowego i kątownego poszczególnych członów przedstawione na rys.7.3.

Rozwiązanie:

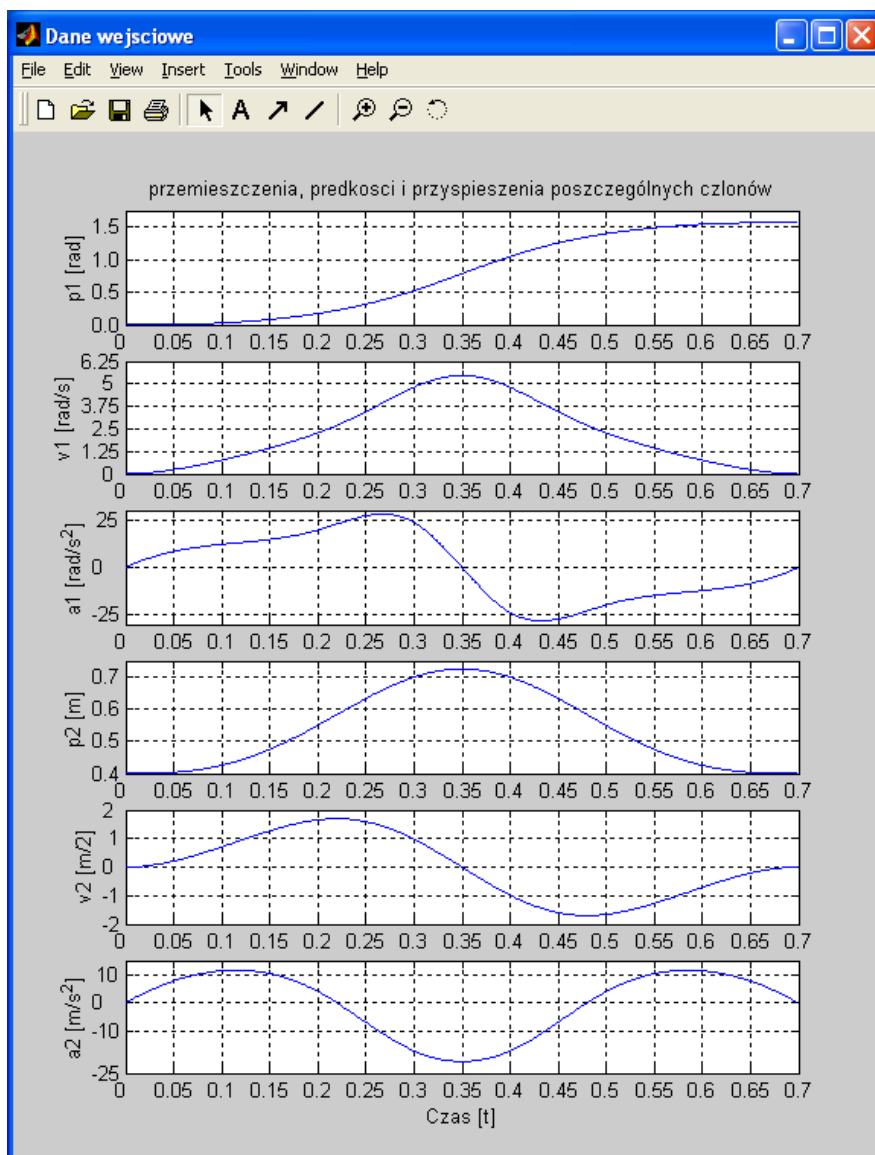
W celu rozwiązania zadania odwrotnego dynamiki wykorzystano dynamiczne równania ruchu wyznaczone dla przykładu 7.1, traktując analizowany układ nadal jako zachowawczy, w postaci:

$$2m_2\lambda_2\ddot{\theta}_1 + (J_1 + J_2 + m_1l_1^2 + m_2\lambda_2^2)\ddot{\theta}_1 + (m_1l_1 + m_2\lambda_2)g \cos(\theta_1) = M_1 \text{ [Nm]}$$

$$m_2\ddot{\theta}_2 - m_2\lambda_2\ddot{\theta}_1 + m_2g \sin(\theta_1) = F_2 \text{ [N]}$$

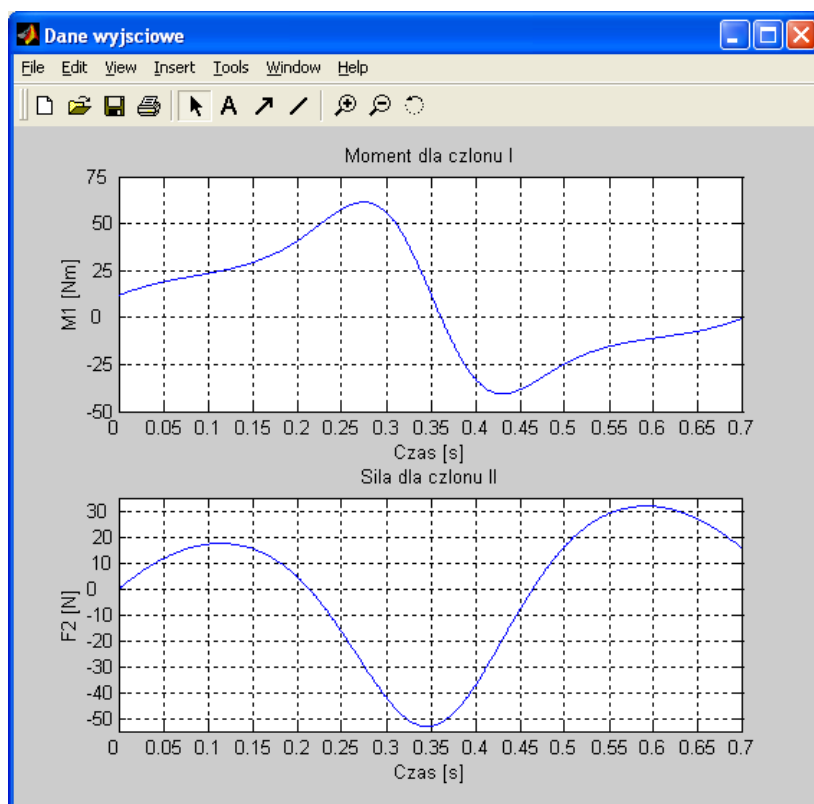
Na podstawie znanego przemieszczenia kątownego i liniowego (rys.7.3) wyznaczono prędkości i przyspieszenia poszczególnych członów przedstawione na

rys.7.4, które następnie wykorzystano do rozwiązania zadania odwrotnego dynamiki.



Rys.7.4. Przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia poszczególnych członów

W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej rozwiązano zadanie odwrotne dynamiki dla analizowanego dwuczłonowego manipulatora, a rezultat obliczeń zamieszczono na rys.7.5.



Rys.7.5. Przebiegi czasowe momentu dla członu I i siły dla członu II

W podobny sposób można rozwiązywać zadanie odwrotne dynamiki dla bardziej złożonych struktur manipulatorów.

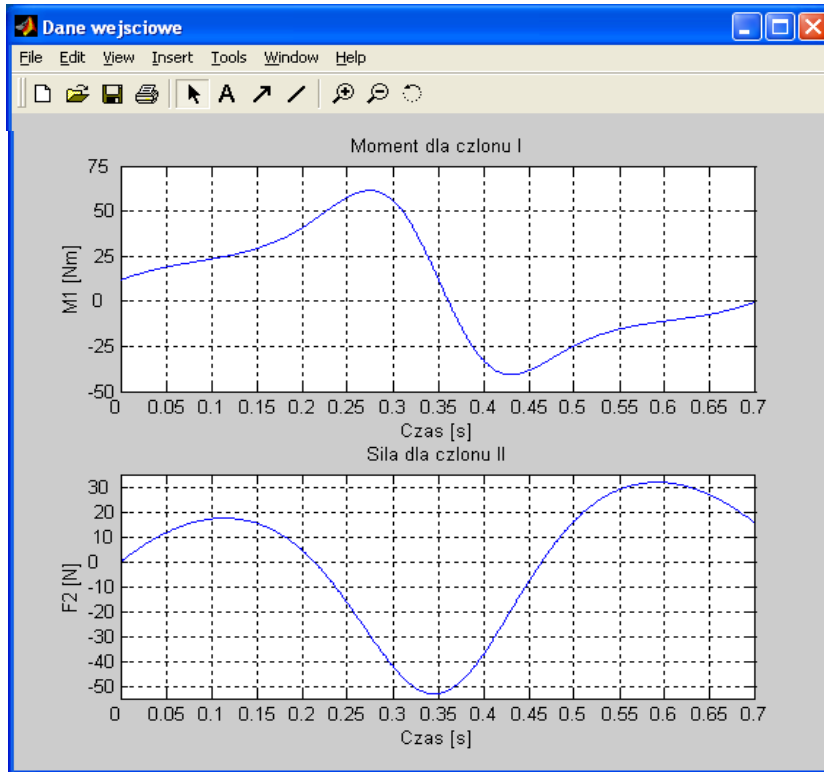
7.4. Dynamika prosta

W zadanie prostym dynamiki należy wyznaczyć parametry związane z ruchem manipulatora będącego pod działaniem sił i momentów napędowych, tzn. dany jest wektor τ , a należy wyznaczyć położenie, prędkości i przyspieszenia.

Przykład 7.3

Rozwiązać zadanie prostego dynamiki, czyli wyznaczyć przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia poszczególnych członów występujące na dwuczłonowym manipulatorze z przykładu 7.1, mając następujące dane: masa członu I $m_1=3$ [kg], długość członu I $l_1=0.2$ [m], moment bezwładności I członu $J_1=0.38$ [kg·m²], masa członu II $m_2=1.5$ [kg], moment bezwładności II członu $J_2=0.1$ [kg·m²] oraz przyspieszenie ziemskie $g=9.81$ [m/s²]. W chwili początkowej człon II znajdował się w odległości $\lambda_0=0.4$ [m] od środka obrotu manipulatora. Znane są przebiegi czasowe

momentu występującego na członie I oraz siły na członie II, zilustrowane na rys.7.6.



Rys.7.6. Przebiegi czasowe momentu dla członu I i siły dla członu II

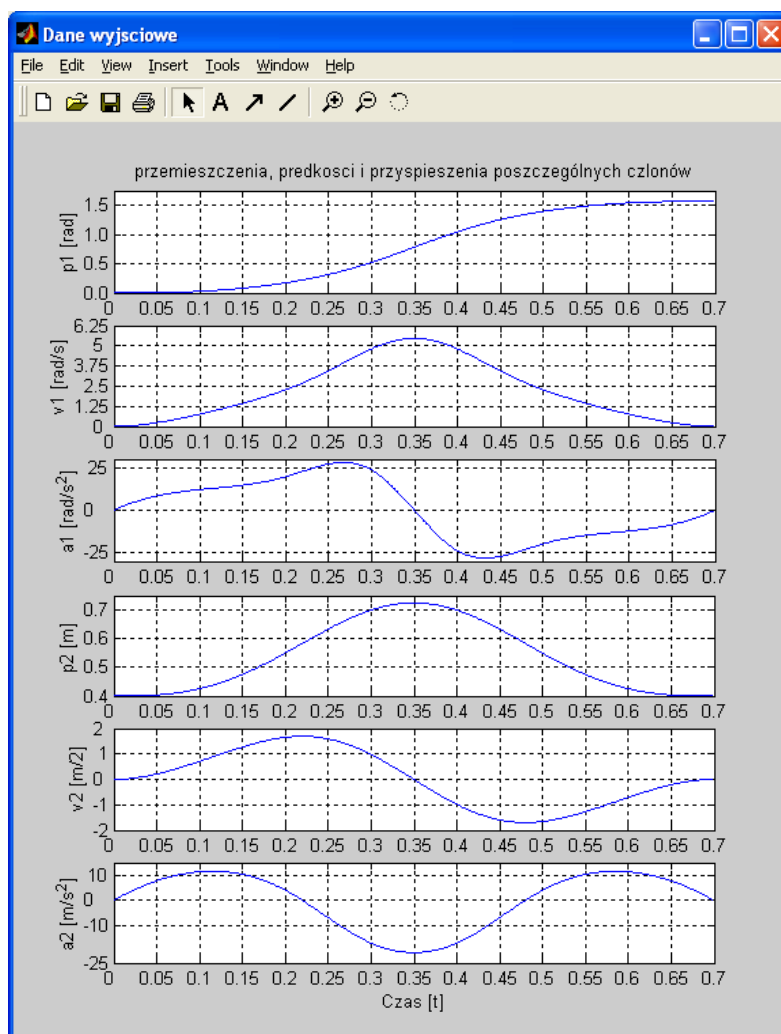
Rozwiązanie:

W celu rozwiązania zadania prostego dynamiki wykorzystano dynamiczne równania ruchu wyznaczone dla przykładu 7.1, traktując analizowany układ jako zachowawczy, w postaci przekształconej względem drugich pochodnych:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{M_1 - 2m_2\lambda_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - (m_1l_1 + m_2\lambda_2)g \cos(\theta_1)}{(J_1 + J_2 + m_1l_1^2 + m_2\lambda_2^2)} \left[\frac{1}{s^2} \right]$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{F_2 + m_2\lambda_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2g \sin(\theta_1)}{m_2} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej rozwiązano zadanie proste dynamiki dla analizowanego dwuczłonowego manipulatora, a rezultat obliczeń zamieszczono na rys.7.7.



Rys.7.7. Przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia poszczególnych członów

W podobny sposób można rozwiązywać zadanie proste dynamiki dla bardziej złożonych struktur manipulatorów.

8. NAPĘDY ROBOTÓW

Współczesne napędy maszyn technologicznych, aby sprostać zadaniom, jakie stawia przed nimi postępujący w szybkim tempie rozwój nowych technik wytwarzania i wymogom konkurencji rynkowej, muszą spełniać określone wymagania:

- dobry start, rozruch i hamowanie,
- dokładne pozycjonowanie,
- łatwe sterowanie prędkością i przyspieszeniem,
- dobra dynamika,
- stabilność pracy,
- wysoka jakość,
- niezawodność i skuteczność techniczną,
- niska cena.

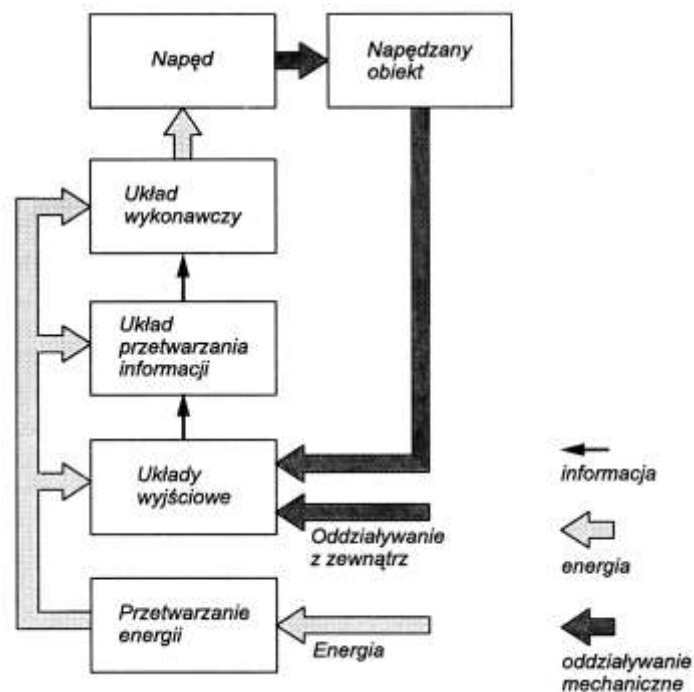
Wymagania te może spełnić napęd, w którym zostaną wykorzystane najlepsze cechy elektroniki i techniki cyfrowej (szybkość, elastyczność) w zakresie sterowania oraz (uzyskiwanie dużych sił, prędkości i momentów) w zakresie własności konstrukcyjnych napędu.

Jednym z głównych zadań projektantów napędów maszyn technologicznych, jest szeroko pojęta dokładność pozycjonowania przy zmieniających się siłach zewnętrznych pochodzących od zmiennych obciążeń technologicznych.

Szczególna rolę w budowie napędów o dużej dokładności pozycjonowania spełnia napęd liniowy. Istnieje wiele konstrukcji i rodzajów napędów o ruchu prostoliniowym. Napędy hydrauliczne lub pneumatyczne są przykładami takich struktur, w których ruch prostoliniowy to ruch pierwotny. W porównaniu do liniowych napędów elektrycznych, w których dokładność pozycjonowania jest rzędu $0,1\mu\text{m}$, elektrohydrauliczny napęd liniowy cechuje dokładności pozycjonowania w granicach $0,1\text{mm}$

Napęd robotów przemysłowych obejmuje zbiór środków technicznych, przeznaczonych do wprawiania w ruch wszystkich członów układu kinematycznego oraz chwytaka, stosownie do wymagań procesu technologicznego. Zadaniem takich układów napędowych jest dostarczenie wymaganej porcji energii mechanicznej do zespołów obiektów, zgodnie z algorytmem jego pracy. Działanie takiego układu polega, więc na przekształceniu energii dostarczonej (najczęściej elektrycznej, sprężonego powietrza lub sprężonej cieczy) w energię mechaniczną. Ogólny schemat układu realizującego wymienione zadania przedstawia *rys.8.1*.

Układ przetwarzania energii jest układem pomocniczym, w którym następuje dostosowanie energii do postaci wymaganej przez układ napędowy. Przykładowo dla energii elektrycznej dostosowanie to może polegać np. zmianie wartości napięcia zasilania, stabilizacji jego wartości, czy też zmianie napięcia stałego na przemiennie. W przypadku, gdy czynnikiem roboczym jest ciecz, czynności te polegają między innymi na ustaleniu wartości jego przepływu i ciśnienia.



Rys. 8.1. Ogólny schemat układu napędowego

Układy wejściowe mają za zadanie zainicjowanie cyklu pracy układu napędowego – inicjacja może polegać np. na włączeniu urządzenia przez obsługującego pracownika (tzw. oddziaływanie zewnętrzne). Do układów wejściowych mogą docierać bezpośrednio również sygnały z napędzanego obiektu np. w sytuacji, gdy założymy, aby cykl pracy mechanizmu podającego rozpoczynał się po pojawieniu półwyrobu w określonym miejscu (np. zasobniku). Informacje z układów wejściowych przekazywane są do układu przetwarzania informacji. Zadaniem tego układu zgodnie z założonym algorytmem jest wypracowanie rozkazów i przekazanie ich w odpowiedniej fazie cyklu pracy do napędu.

Układ wykonawczy ma za zadanie wzmacnić sygnał pojawiający się na wyjściu układu przetwarzania informacji. Zastosowanie tego układu jest konieczne, gdy moc sygnałów z układu przetwarzania informacji jest niewystarczająca do wytworzenia przez napęd wymaganej postaci energii mechanicznej.

Przy konstruowaniu robota wybór odpowiedniego rodzaju napędu jest bardzo ważną częścią zadania konstrukcyjnego. Przy doborze napędu należy uwzględnić:

- charakter obciążenia napędu;
- parametry kinematyczne manipulatora, tj. przemieszczenia translacyjne i kątowne, prędkości i przyspieszenia;
- liczbę punktów i dokładność pozycjonowania albo odtworzenia trajektorii;
- fizyczne cechy obiektu manipulacji (twardy, kruchy, ciekły);

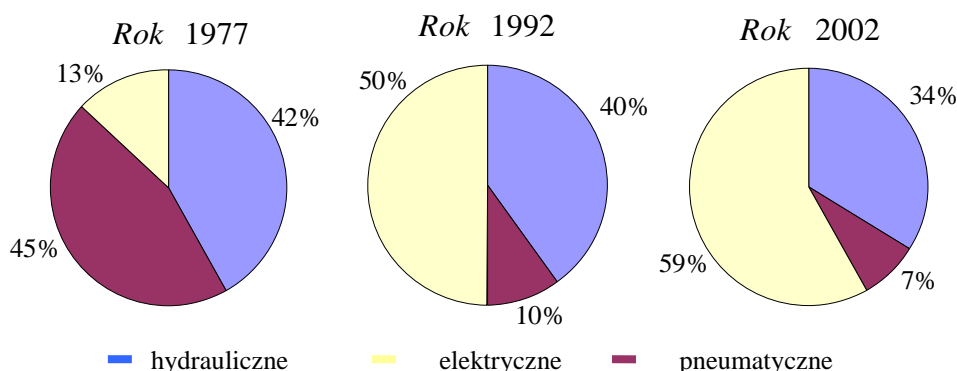
- warunki eksploatacji robota (okres pracy, ekonomiczność) i charakterystykę otaczającego środowiska, tj. niebezpieczeństwo pożaru, zanieczyszczenie, temperatura, oddziaływanie mechaniczne i inne.

Rodzaj zastosowanego napędu wpływa na charakterystyki energetyczne, dokładnościowe i dynamiczne robotów. Poza tym rodzaj napędu określa zarówno możliwości systemu sterowania, jak i stopień ingerencji maszynowej robota.

Współczesne roboty przemysłowe mają dużą liczbę stopni ruchliwości (z reguły $6 \div 7$), każdemu z tych stopni odpowiada odrębny element wykonawczy napędu (silnik). Aby zrealizować konkretną operację technologiczną należy sterować grupą elementów wykonawczych. Dlatego z punktu widzenia sterowania robota napęd jego należy traktować jako system;

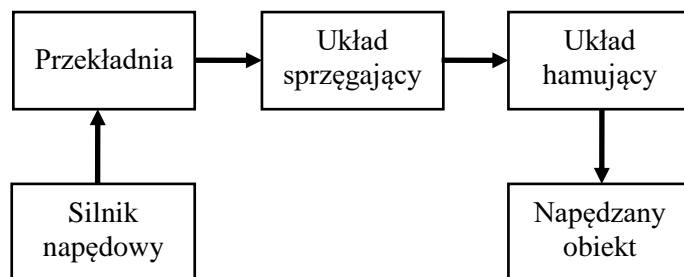
W szerokich granicach zmienia się zakres obciążeń napędów (głównie obciążeń masowych), co ma decydujący wpływ na wybór napędu. W robotach o udźwigu ok. 20kg stosuje się napędy pneumatyczne i elektryczne, przy dużym udźwigu robota – powyżej 100kg – stosuje się napędy elektrohydrauliczne.

Rys.8.2 przedstawia procentowe porównanie stosowalności napędów badane od 1977r. do 2002r. Jak widać wzrosła zdecydowanie stosowalność napędu elektrycznego, którego technologia w ostatnich latach przyniosła wiele nowości takich jak: napędy bezpośrednie, silniki krokowe, czy liniowe. Napęd pneumatyczny ze względu na wiele niekorzystnych wad i kłopotów konstrukcyjnych traci swoją popularność. Nowe rozwiązania układów pneumatycznych typu serwo dają szansę na większą stosowalność tego typu napędów w robotach. Hydrauliczne układy nadal pozostają podstawowym napędem robotów o dużych udźwigach i przenoszących duże obciążenia.



Rys.8.2. Udział procentowy różnego rodzaju napędów stosowanych w robotach

Z reguły dostępne silniki nie zapewniają wymaganych wartości przemieszczenia (kątownego lub liniowego), prędkości czy też dostępnej wartości momentu obrotowego. Dlatego pod pojęciem napędu należy rozumieć nie tylko sam silnik (elektryczny, hydrauliczny, pneumatyczny itp.), lecz także różnego typu przekładnie oraz układy sprzęgające i hamujące. Rys.8.3 przedstawia blokowy schemat napędu.

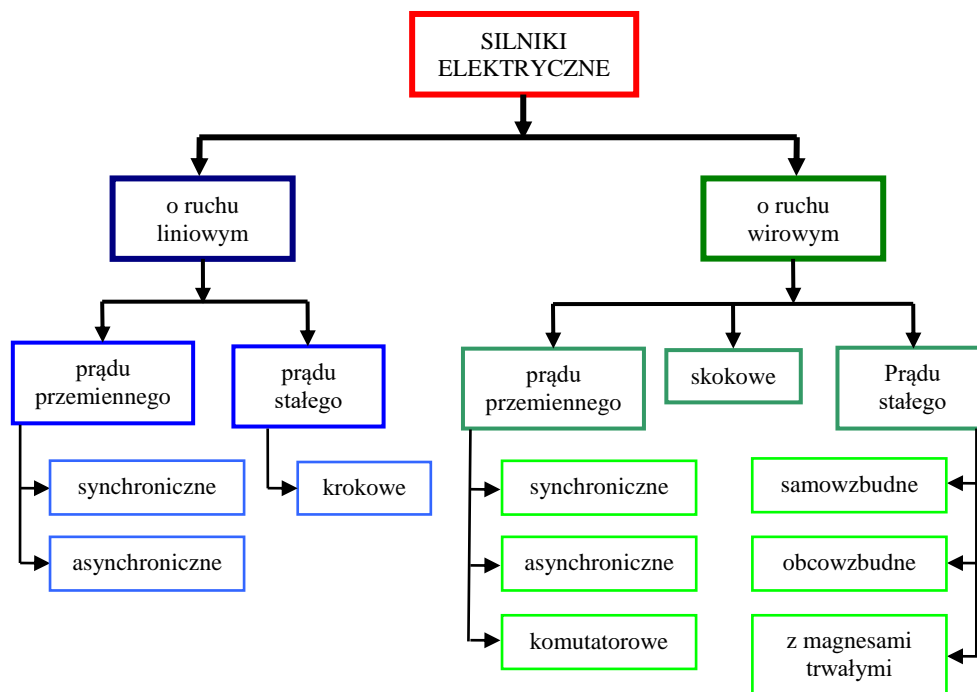


Rys.8.3. Przykładowy schemat blokowy napędu

Zadaniem przekładni jest zapewnienie możliwości uzyskania prędkości (obrotowych i liniowych) oraz momentu siły, odpowiadających aktualnemu zapotrzebowaniu danego mechanizmu. Natomiast sprzęgła i hamulce, zwykle elektromagnetyczne, pozwalają na przekazanie energii mechanicznej do tych mechanizmów w ściśle określonych chwilach czasu. Właściwości tych zespołów decydują o charakterze rozruchu i hamowania ruchu poszczególnych zespołów oraz o czasie ich trwania.

8.1. Napęd elektryczny

Ogólną klasyfikację silników elektrycznych przedstawia rys.8.4.



Rys.8.4. Ogólna klasyfikacja silników elektrycznych

WPROWADZENIE DO ROBOTYKI

W ostatnich latach następuje coraz szybszy wzrost zastosowań napędów elektrycznych w robotach przemysłowych. Dzięki swej zunifikowanej budowie mogą one współpracować z maszynami wyposażonymi w systemy hydrauliczne. Wśród nowych rozwiązań napędów elektrycznych należy wymienić: napędy prądu stałego z wysokomomentowymi komutatorowymi silnikami prądu stałego, bezszczotkowymi silnikami prądu stałego i wysokomomentowymi silnikami skokowymi (tzw. krokowe).

Charakterystycznymi cechami napędów elektrycznych są:

- rozszerzony (do 0.05Nm) przedział małych momentów,
- podwyższona (do 15×10^3 obr/min) maksymalna prędkość obrotowa,
- zmniejszona bezwładność silnika,
- możliwość wbudowania w silnik hamulców elektromagnetycznych i czujników, a także mechanicznych przekładni falowych.

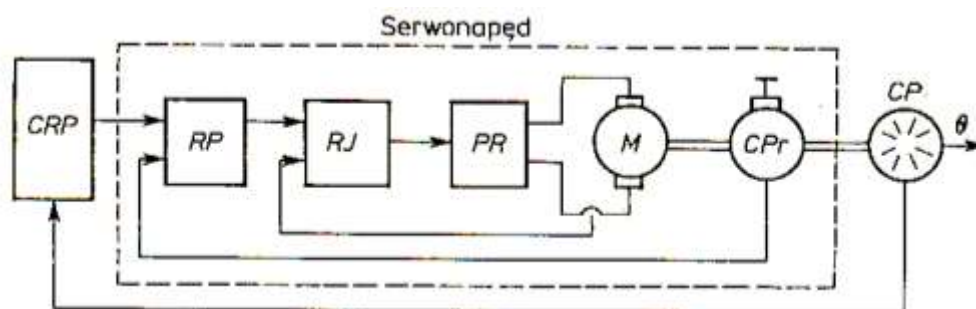
Podstawowymi zaletami napędów elektrycznych są:

- dostępność energii i jej stosunkowo niski koszt,
- możliwość transformacji energii,
- duża sprawność silników elektrycznych,
- prosta i zwarta konstrukcja oraz niewielki ich koszt,
- duża szybkość działania i stałość prędkości obrotowej,
- wysoka dokładność przemieszczeń i łatwe sterowanie (dzięki zastosowaniu cyfrowych układów pomiarowych),
- niski poziom szumów i wibracji, małe zanieczyszczenia,
- łatwa konserwacja oraz eksploatacja bez nadzoru i obsługi (zwłaszcza przy silnikach bezszczotkowych),
- bezpieczeństwo pracy (stopień ochrony wg PN-79/E-08106).

Do wad napędów elektrycznych należy zaliczyć:

- ograniczone wykorzystanie w środowiskach zagrożonych wybuchem w silnikach z komutatorem szczotkowym (a co za tym idzie ograniczona trwałość szczotek),
- zależność prędkości od obciążenia, co wymaga rozbudowy układu regulacji napędu,
- występowanie dodatkowych przekładni między silnikiem elektrycznym i elementem wykonawczym robota,
- stosunek mocy do masy lub momentu do masy jest gorszy niż w silnikach hydraulicznych (zbyt duża masa obwodów magnetycznych poprawę można uzyskać przez stosowanie magnesów stałych).

Układy napędu elektrycznego robotów są budowane według ogólnego schematu przedstawionego na rys.8.5.



Rys.8.5. Schemat układu napędu elektrycznego robotów

Jest to układ analogowo - cyfrowy sterowania automatycznego. Łączy on zalety układu analogowego, pracującego według zasady wieloobwodowego układu regulacji z zaletami układu cyfrowego (duża dokładność czujników cyfrowych, wygoda programowania itp.).

Pierwszy obwód regulacji tworzą: silnik (M) z przetwornikiem (PR) i regulatorem prądu (RJ). Do drugiego obwodu oprócz już wymienionych wchodzi czujnik prędkości (CPr) i regulator prędkości (RP). Trzeci obwód regulacji zawiera dodatkowo czujniki położenia kąowego (CP) i cyfrowy regulator położenia (CRP).

Podsumowując układ napędu elektrycznego robota składa się z następujących zespołów: elementu wykonawczego (silnika); przetwornika; czujników sprzężenia zwrotnego prądu, prędkości i kąta; regulatorów – prądu, prędkości i kąta (położenia). Jako regulatory prądu i prędkości najczęściej wykorzystuje się analogowe wzmacniacze operacyjne, za pomocą, których łatwo realizuje się żądany rozkaz sterujący. Czujnik prędkości może być zarówno analogowy jak i cyfrowy.

W książce tej ograniczymy się jedynie do omówienia elektrycznych napędów liniowych. Pozostałe rodzaje napędów elektrycznych omówione zostały w drugiej części skryptu.

8.1.1. Elektryczne napędy liniowe

Silniki liniowe znane były już od drugiej połowy IX wieku, jednak znaczny ich rozwój nastąpił dopiero w ostatnich latach. Napędy te należą do najnowszych rozwiązań konstrukcyjnych w dziedzinie napędów robotów, manipulatorów oraz serwonapędów obrabiarkowych. Ich bardzo dynamiczny i szybki rozwój zawdzięcza się coraz ostrzejszym wymaganiom, jakim muszą sprostać, a są to:

- wzrost dokładności pozycjonowania (np. w tzw. obrabiarkach ultra precyzyjnych uzyskuje się dokładność pozycjonowania ok. $0.1\mu\text{m}$, tj. o rząd wyższą, niż w najdokładniejszych obrabiarkach NC z serwonapędami obrotowymi z przekładnią śrubowo toczną),
- wzrost prędkości ruchu, i to zarówno tzw. posuwu szybkiego, jak i posuwu roboczego. Napędy liniowe umożliwiają osiąganie prędkości ruchu posuwowego do 700m/min, podczas gdy prędkość najszybszego ruchu posuwowego

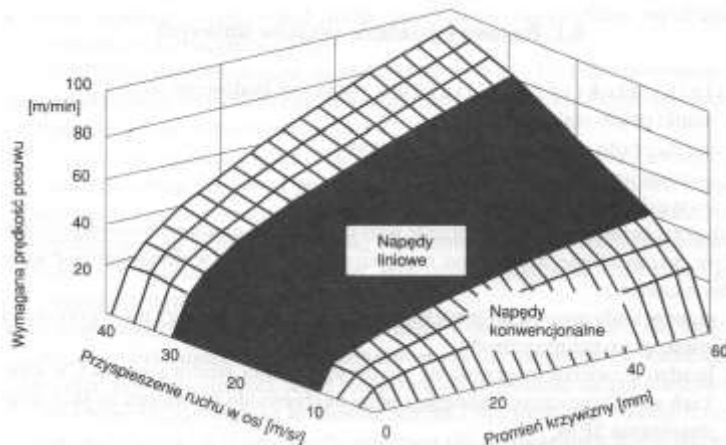
z silnikiem obrotowym i przekładnią śrubową toczną nie przekracza 30 (60)m/min,

- wzrostu przyspieszenia ruchu w stanach przejściowych; w napędach z silnikami obrotowymi i z przekładnią śrubową toczną największe osiągnięte przyspieszenia ruchu nie przekraczają 10m/s^2 , natomiast w napędach liniowych dochodzą do 120m/s^2 ,
- wzrostu dynamiki sterowania, uwidaczniającego się m.in. w realizacji znacznie bardziej skomplikowanych algorytmów sterowania w porównywalnym czasie obliczeń,
- wzrostu drogi przesuwu w zespołach obrabiarkowych; napędy obrotowe z przekładnią śrubową toczną umożliwiają przesuwu poniżej 6m (nie stosuje się dłuższych śrub), natomiast napędy liniowe – nawet powyżej 50m.

Rozwój napędów liniowych jest także wynikiem dążeń do uniknięcia wad napędów obrotowych z przekładnią śrubowo toczną, takich jak:

- duże dodatkowe masy bezwładne śrub tocznych, kół zębatych lub pasowych, wałków,
- znaczna podatność łańcucha kinematycznego ruchu posuwowego, wpływająca na dokładność ruchu i na powstawanie drgań,
- nieliniowości histerezy spowodowane nieczułością tarciovą,
- ograniczona długość przemieszczeń spowodowana uginaniem się długich śrub tocznych pod ciężarem własnym.

Nowoczesne napędy ruchu posuwowego, zdecydowanie wypierają konwencjonalne napędy obrabiarek, wynika to głównie z wymagań technologicznych (jakości powierzchni, wydajności obróbki, dokładności wymiarowo-kształtowej). Na rys.8.6 przedstawiono wymagania, jakim będą musiały sprostać nowoczesne napędy liniowe. Wymagania wynikające z coraz większych przyspieszeń ruchów (zwłaszcza interpolowych), oraz promieni krzywizny powierzchni uzyskiwanych w wyniku interpolacji, mają swoje uzasadnienie w dokładności zarysów kształtów.



Rys.8.6. Wymagania eksploatacyjne stawiane nowoczesnym napędom posuwowym obrabiarek, wynikające z kryteriów technologicznych

Z przedstawionego rys.8.6 wynika, że napędy konwencjonalne, z silnikami obrotowymi i ze śrubami tocznymi, nie spełniają tych wymagań. Natomiast napędy z silnikami liniowymi spełniają je w zakresie prędkości do ok. 100m/min, i dla przyspieszeń do ok. 3g (30m/s²).

Niestety obecnie produkowane i dostępne napędy liniowe bezpośrednie ustępują napędom obrotowym z przekładnią śrubową toczną pod względem siły posuwu. Maksymalne siły posuwu dla napędów liniowych nie przekraczają jak dotychczas 15kN, co jest ok. 5 razy mniej niż w napędach obrotowych, dlatego więc zastosowanie ich ogranicza się do maszyn lekkich.

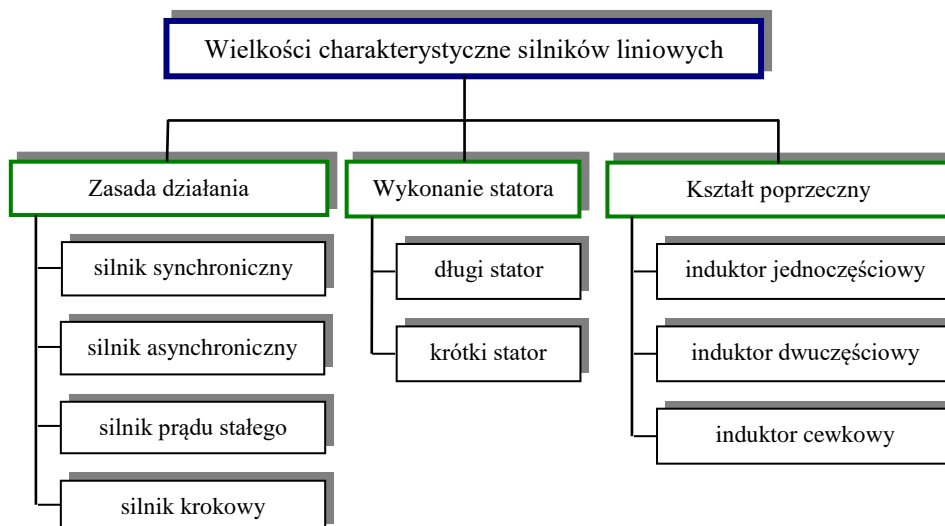
Na podkreślenie zasługuje również fakt, że napędy liniowe są budowane w postaci zintegrowanej, łącznie z mechanizmami prowadnicowymi. Oznacza to wyeliminowanie pośrednich mechanizmów między źródłem energii (silnikiem) a napędzanym zespołem.

8.1.2. Budowa silników liniowych

Liniowe silniki elektryczne mogą być budowane jako:

- silniki prądu stałego,
- silniki prądu przemiennego (trójfazowe):
 - asynchroniczne;
 - synchroniczne.

Na rys.8.7 zebrano silniki liniowe i podzielono je według różnych zasady działania, oraz wykonania.



Rys.8.7. Wielkości charakteryzujące elektromechaniczne silniki liniowe

Silnik liniowy składa się z dwóch podstawowych części:

- części pierwotnej (ruchomej), zwanej statorom lub induktorem,
- części wtórnej (nieruchomej), zwanej bieźnikiem.

Spotyka się również silniki, w których część wtórna jest ruchoma, natomiast część pierwotna jest zwielokrotniona i umieszczona wzdłuż drogi części wtórnej. Długości bieźnika i induktora na ogół różnią się o wartość odpowiadającą przesunięciu robocznemu. Induktor dłuższy od bieźnika stosuje się rzadko, głównie w przypadkach, gdy część ruchoma powinna mieć dobre własności dynamiczne. W przeważającej jednak liczbie przypadków bieźnik jest dłuższy od induktora.

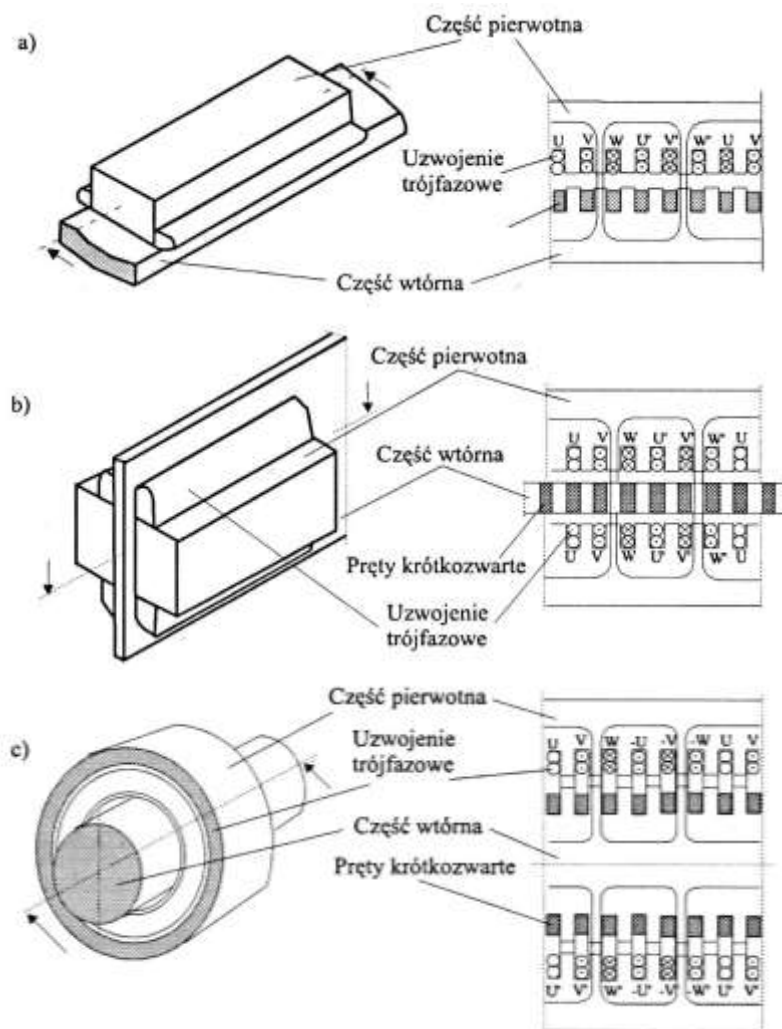
Aby uzyskać względny ruch między częścią pierwotną a wtórną, jedną z nich należy przedłużyć. Wyróżnia się przy tym silniki o długim i o krótkim statorze.

W silnikach o długim statorze uzwojenia statora są rozłożone wzdłuż całej jego długości. Krótsza część wtórna współpracuje jedynie z małą częścią długiego statora. Wada takiego rozwiązania polega na tym, że w każdej chwili całe uzwojenie statora jest zasilane, a tylko jego mały odcinek przyczynia się do wytworzenia siły działającej w kierunku przesuwu. Moc strat wzrasta proporcjonalnie do drogi przemieszczenia. Również ta część uzwojenia statora, która nie współpracuje aktualnie z częścią wtórną, zwiększa indukcyjność rozproszenia, przez co znacznie jest ograniczona dynamika i maksymalna prędkość napędu. Z tego powodu silniki bezszczotkowe z długim statorom są stosowane w serwonapędach tylko do krótkich przemieszczeń.

W silnikach o krótkim statorze część pierwotna jest krótsza niż część wtórna. Cały stator uczestniczy w wytwarzaniu siły, dlatego ze względu na straty związane z rezystancją i rozproszeniem magnetycznym, są podobne do tych z silników o ruchu obrotowym.

Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych silników liniowych przedstawia *rys.8.8* zarówno z częścią pierwotną pojedynczą (*rys.8.8a*), z podwójną (*rys.8.8b*) oraz silniki tubowe, (solenoidalne *rys.8.8c*).

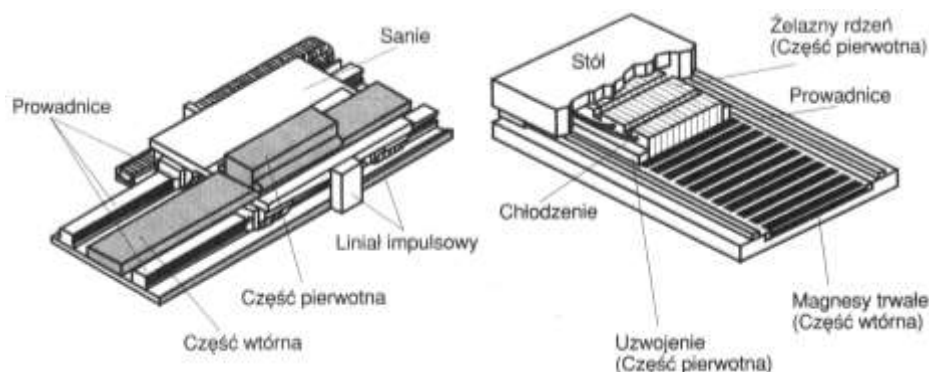
Część pierwotna jest wykonana w postaci trójfazowego uzwojenia (U, V, W), które jest zasilane trójfazowym prądem przemiennym. Analogicznie jak dla silników trójfazowych wytwarzane jest pole magnetyczne wędrujące (w silniku klasycznym odpowiednikiem jest wirujące pole magnetyczne). Prędkość przemieszczenia się wektora strumienia magnetycznego jest wprost proporcjonalna do częstotliwości prądu zasilającego.



Rys.8.8. Budowa silnika liniowego asynchronicznego: a) z pojedynczą częścią pierwotną, b) z podwójną, c) tubowy (solenoidalny)

Część wtórna silnika (nieruchoma) jest składnikiem przewodnicy (rys.8.9) i wykonana jest w postaci:

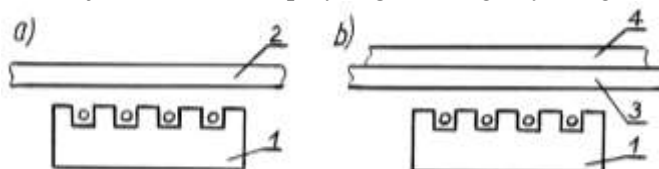
- listwy w formie grzebienia (rdzeniów) z nawiniętym (wokół każdego rdzenia) miedzianym uzwojeniem – dla silnika asynchronicznego,
- linału z magnesami trwałymi rozmieszczonymi wzdłuż całej długości przewodnicy – dla silnika synchronicznego,
- linału z elementami z materiału ferromagnetycznego rozmieszczonymi wzdłuż przewodnicy.



Rys.8.9. Schemat silnika liniowego i układu prowadnicowego

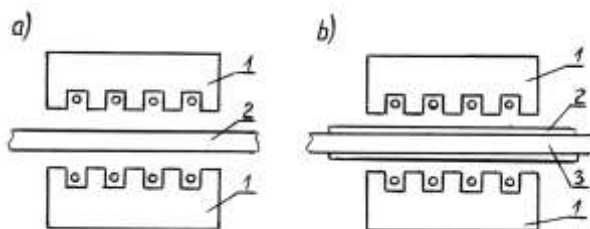
Dla bieznika ferromagnetycznego występują siły przyciągania magnetycznego, między bieznikiem a induktorem, które są na ogół zjawiskiem szkodliwym. Natomiast w przypadku bieznika niemagnetycznego zachodzi odpychanie, które może być wykorzystane do unoszenia części ruchomej (rodzaj poduszki magnetycznej).

W silnikach liniowych płaskich jednostronnych z bieznikiem niemagnetycznym rys.8.10a prąd magnesujący jest duży, ponieważ obwód magnetyczny ma dużą reluktancję, przyczyną tego jest zbyt długa droga w powietrzu, jaką musi przebyć strumień magnetyczny. Aby temu zapobiec stosuje się bieznik warstwowy złożony z blachy przewodzącej nieferromagnetycznej i blachy stalowej rys.8.10b. Blacha stalowa zmniejsza reluktancję obwodu magnetycznego i wzmacnia bieznik mechanicznie, wprowadza jednak działanie przyciągania magnetycznego.



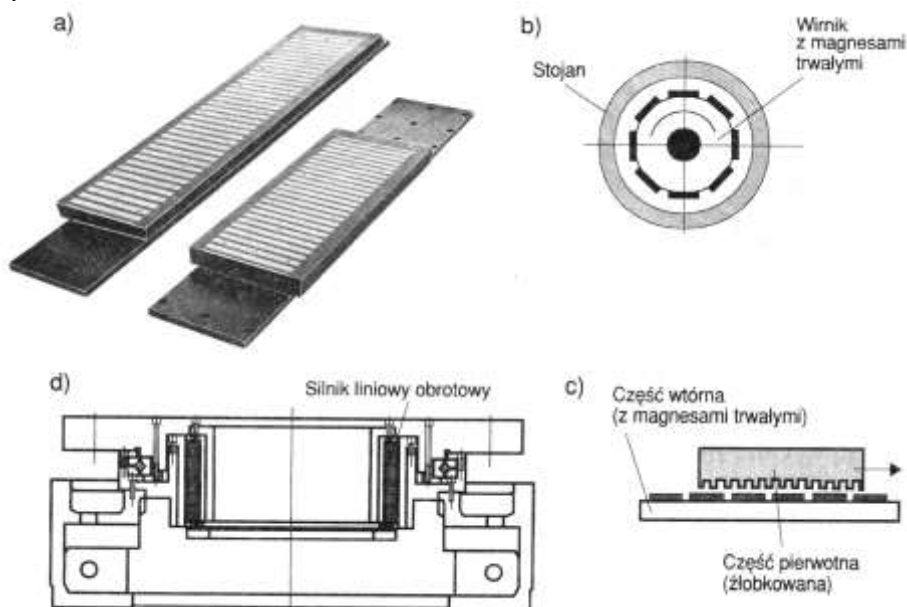
Rys.8.10. Silnik liniowy płaski z jednostronnym induktorem: a) z bieznikiem jedno-warstwowym, b) z bieznikiem dwuwarstwowym. 1 – induktor, 2 – płyta ferromagnetyczna lub niemagnetyczna, 3 – płyta niemagnetyczna, 4 – płyta ferromagnetyczna

W przedstawionym na rys.8.11 silniku liniowym płaskim dwustronnym (z dwustronnym induktorem), dzięki istnieniu dwóch induktorów umieszczonych symetrycznie względem bieznika, siły przyciągania magnetycznego znoszą się. Przy tej samej szczelinie i przy tych samych parametrach konstrukcyjnych moc silnika dwustronnego jest cztery razy większa od mocy silnika jednostronnego.



Rys.8.11. Silnik indukcyjny liniowy płaski z dwustronnym induktorem: a) z bieżnikiem jednowarstwowym; b) z bieżnikiem dwuwarstwowym. 1 – induktor, 2 – płyta niemagnetyczna, 3 – płyta stalowa

Przykłady konstrukcyjne silników liniowych synchronicznych przedstawione są na rys.8.12.

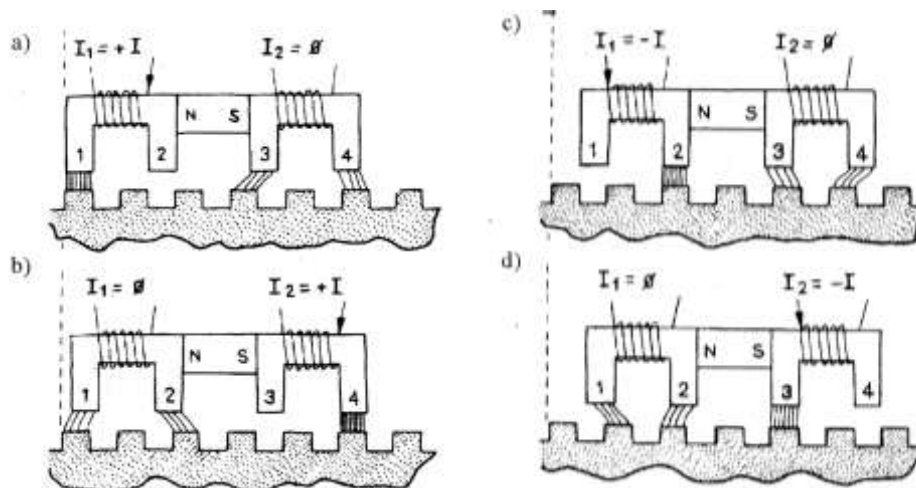


Rys.8.12. Schemat budowy silników synchronicznych: a) i c) liniowego, b) obrotowego, d) liniowego – obrotowego

8.1.3. Zasada działania silników liniowych

Silniki liniowe przetwarzają, za pośrednictwem pola magnetycznego, energię elektryczną na energię mechaniczną – ruch postępowy. Powierzchnie czynne części pierwotnej i wtórnej są do siebie równoległe, uzwojenie części pierwotnej wytwarza w szczelinie między tymi płaszczyznami pole magnetyczne. Pole to w części wtórnej indukuje prądy, które z kolei wytwarzają pole części wtórnej. Wzajemne oddziaływanie na siebie pól części pierwotnej i wtórnej daje w wyniku siłę pociągową.

Na rys.8.13a-d pokazano fazy ruchu liniowego silnika elektrycznego. Każda nowa faza pobudzenia wywołuje przemieszczenie o $\frac{1}{4}$ podziałki ruchu bieźnika w stosunku do okienek. W ten sposób realizuje się ruch o $\frac{3}{4}$ podziałki.



Rys.8.13. Fazy ruchu dwufazowego liniowego silnika elektrycznego

8.1.4. Zastosowanie silników liniowych

Mechaniczne rozwiązania konstrukcji silników liniowych umożliwiają uzyskiwanie praktycznie nieograniczonych przemieszczeń. Obecnie są oferowane przez producentów silniki liniowe o sile posuwu ok. 15kN. Wynikają z tego zupełnie nowe możliwości ukształtowania konstrukcyjnego maszyn wytwórczych.

Możliwości zastosowań silników liniowych są rozległe:

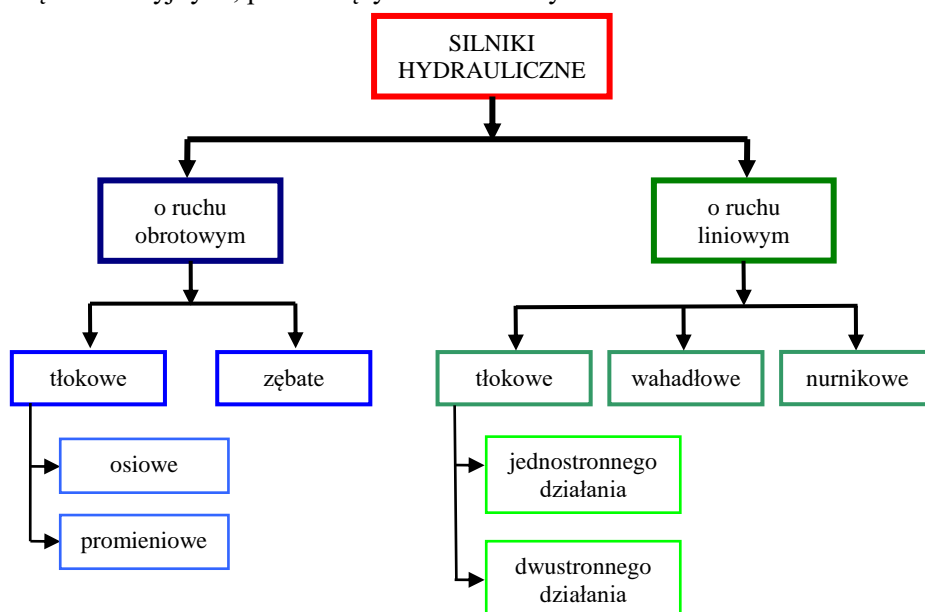
- robotyka (napędy manipulatorów i robotów),
- przemysł maszynowy (obrabiarki różnego rodzaju),
- przemysł samochodowy (układy nawiewów, otwierania i zamykania szyb itp.),
- transport zakładowy (małe wagoniki, taśmociągi, suwnice),
- przemysł włókienniczy i tekstylny (mechanizmów pracuje w ruchu posuwisto – zwrotnym),
- w układach automatyki i w elementach nastawczych (pozycjonowanie anten, urządzenia pakujące, automatyczne otwieranie okien i drzwi itp.),
- transport płynów przewodzących (np. płynnego żeliwa w odlewniach),
- szpitalnictwo (urządzenia rehabilitacyjne, automatyczne łóżka szpitalne, podnośniki dla niepełnosprawnych, wózki inwalidzkie, urządzenia do masażu, instrumenty medyczne),
- wyposażenie biurowe (automatyczne biurka, automatyczne stoły kreślarskie kopiarki, itp.),

- trakcja elektryczna (superszybkie pociągi przyszłości),
- maszyny pomiarowe.

8.2. Napęd hydrauliczny

W układach hydraulicznych czynnikiem roboczym jest sprężony płyn. W stosunku do napędów pneumatycznych ma on małą ściśliwość i dużą gęstość. Budowa takiego układu jest podobna do napędów pneumatycznych, przy czym prędkości (obrotowe jak i liniowe) elementów czynnych silników hydraulicznych są mniejsze natomiast zdecydowanie większe są wartości uzyskiwanych sił.

Napęd elektrohydrauliczny powszechnie stosuje się w robotach przemysłowych o dużym i bardzo dużym udźwigu. Szczególną cechą robotów o tak dużych udźwigach jest występowanie nie tylko dużego obciążenia użytecznego, ale i znacznych obciążeń inercyjnych, pochodzących od ruchomych członów robota.



Rys.8.14. Ogólna klasyfikacja silników hydraulicznych

Zalety napędu elektrohydraulicznego:

- łatwość uzyskiwania dużych sił przy małych rozmiarach i ciężarach,
- mała wrażliwość na zmiany obciążenia i przeciążenia, łatwość zabezpieczenia przed przeciążeniem,
- stosunkowo duża szybkość działania,
- wykorzystanie cieczy praktycznie nieściśliwej jako czynnika roboczego umożliwia uzyskanie wysokiej stabilności prędkości przy znacznych zmianach obciążeń, dużej dokładności pozycjonowania i znacznej częstotliwości nawrotów,

- bezstopniowa regulacja prędkości elementu wyjściowego napędu,
- duży współczynnik wzmocnienia mocy (ponad 1000), wysoki współczynnik sprawności przy różnych sposobach regulacji,
- brak dodatkowych mechanicznych połączeń kinematycznych między wyjściowym elementem napędu i elementem roboczym robota,
- duże doświadczenie w budowie tych napędów oraz szeroki asortyment typowych elementów hydraulicznych, wytwarzanych przez przemysł.

Wady napędów hydraulicznych to:

- wykorzystanie cieczy jako czynnika roboczego jest związane ze stosowaniem układów zasilających (zasilacze hydrauliczne), wobec wymagań mobilności i automatyczności robotów, układ zasilający powinien być związany z robotem, co zwiększy jego masę,
- trwałość cieczy roboczej jest ograniczona, oraz jej zakres temperatury pracy (ok. 150°C). Zmiana temp. podczas pracy zmienia własności cieczy w wyniku, czego zmienia się prędkość członu wyjściowego napędu,
- ewentualne zanieczyszczenia przy wycieku oleju.

Napędy elektrohydrauliczne mogą działać wg trzech różnych zasad:

- przy stałym ciśnieniu i stałej wydajności pompy,
- przy stałym ciśnieniu i zmiennej wydajności pompy,
- przy zmiennym ciśnieniu i zmiennej wydajności pompy.

Napędy działające wg dwóch pierwszych zasad nazywają się układami hydraulicznymi ze sterowaniem dławieniowym, a napędy budowane wg trzeciej zasady – układami hydraulicznymi ze sterowaniem objętościowym.

Dokładność pozycjonowania hydraulicznych napędów liniowych jest ogólnie mała (w stosunku do napędów elektrycznych). Wynika ona z wielu czynników, najważniejszymi z nich są:

- struktura układu sterowania i napędu,
- jakość elementów i urządzeń zastosowanych do budowy układów,
- przecieki w elementach wykonawczych, urządzeniach sterujących i regulacyjnych,
- rodzaj i jakość zastosowanych uszczelnień, decydujących nie tylko o przeciekach, ale i o wartości oporów tarcia,
- małej sztywności hydraulicznej, związanej ze ściśliwością oleju. Sztywność ta ponadto ulega poważnym zmianom w funkcji przemieszczenia tłoka (przy wysuwie tłoka z cylindra powiększa się objętość oleju, co jest przyczyną zmniejszenia sztywności). Przyczynia się to także do pogorszenia własności dynamicznych, ponieważ zmniejsza się częstotliwość rezonansowa układu napędowego.

Roboty i manipulatory przemysłowe z napędami elektrohydraulicznymi mają uniwersalne zastosowania. Ich człony manipulacyjne o ruchach postępowych i obrotowych mają sześć stopni ruchliwości, uzyskuje się dokładność pozycjonowania do $\pm 0,1\text{mm}$, objętość przestrzeni roboczej osiąga wartość ponad 30m^3 .

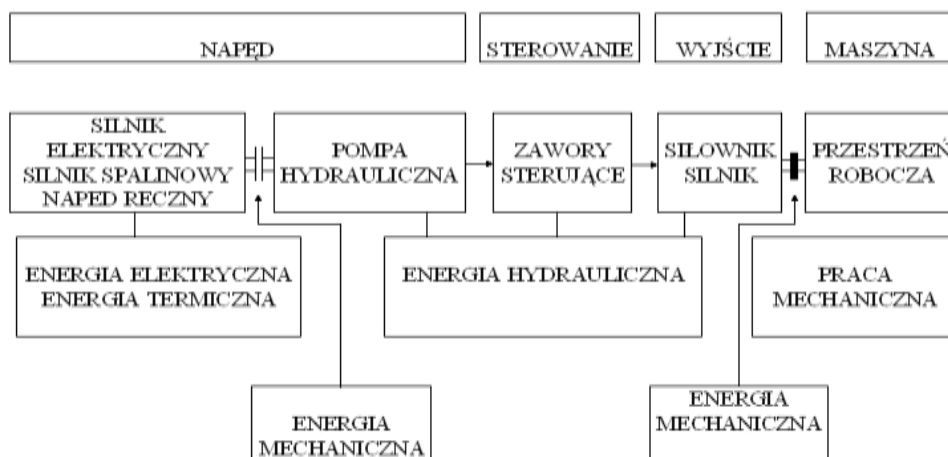
8.2.1. Ogólny schemat blokowy układu hydraulicznego

Na rys.8.15 pokazano ogólny schemat blokowy układu hydrostatycznego, obrazujący przekazywanie poszczególnych form energii, mianowicie:

- dostarczanie energii mechanicznej do układu przez silnik elektryczny, cieplny lub za pomocą napędu ręcznego,
- zamianę energii mechanicznej na energię ciśnienia, nazywaną inaczej energią hydrauliczną, zamiana ta zachodzi w pompie hydraulicznej,
- przekazywanie energii hydraulicznej za pomocą przewodów i elementów sterujących, reagujących na zewnętrzne lub wewnętrzne sygnały sterujące pracą układu. Sygnały te mogą mieć różny charakter fizyczny: elektryczny, mechaniczny, hydrauliczny oraz pneumatyczny,
- zamianę energii hydraulicznej na mechaniczną, zamiana ta zachodzi w hydraulicznym silniku obrotowym lub siłowniku hydraulicznym,
- przekazywanie energii mechanicznej do elementów maszyny roboczej, wykonujących pracę użyteczną.

W związku z tym w każdym układzie hydrostatycznym możemy wyróżnić elementy zaliczane do jednej z poniższych czterech grup:

- pompy, czyli elementy zamieniające dostarczoną z zewnątrz energię mechaniczną na energię ciśnienia cieczy roboczej,
- elementy sterujące, jest to bardzo rozbudowana grupa, do której zaliczamy elementy sterujące kierunkiem przepływu, ciśnieniem, natężeniem przepływu, kierunkiem i natężeniem przepływu oraz magazynujące energię,
- silniki hydrauliczne obrotowe i siłowniki hydrauliczne, czyli elementy zamieniające dostarczoną energię hydrauliczną na energię mechaniczną i przekazujące ją do napędzanego urządzenia,
- elementy pomocnicze, czyli elementy, które nie biorą udziału w funkcjach napędowych i sterujących pracą układu, jednak ich obecność warunkuje połączenie elementów i poprawne działanie układu, zaliczymy do nich: przewody sztywne i elastyczne, zbiorniki, filtry, chłodnice, nagrzewnice i elementy pomiarowe.



Rys.8.15. Ogólny schemat blokowy układu hydraulicznego

8.2.2. Pompy wyporowe

Podstawowym elementem każdego układu hydrostatycznego jest pompa wyporowa. Jej zadaniem jest zamiana energii mechanicznej dostarczonej z zewnątrz na energię ciśnienia cieczy roboczej. Zasada działania pompy wyporowej polega na przetłaczaniu dawek cieczy z przestrzeni ssawnej do tłocznej za pomocą elementów wyporowych. Wielkość dawki określona jest wymiarami komory wyporowej. Warunkiem koniecznym działania pomp wyporowych jest szczelne oddzielenie przestrzeni ssawnej i tłocznej oraz szczelność między komorą a elementem wyporowy

Pompy można klasyfikować w różnorodny sposób, na przykład ze względu na:

- rodzaj ruchu elementów wyporowych,
- możliwość zmiany wydajności,
- według liczby niezależnych strumieni cieczy roboczej.

W zależności od rodzaju ruchu elementów wyporowych można pompy sklasyfikować w następujący sposób:

1. Pompy o ruchu obrotowym elementów wyporowych (rotacyjne).
 - Pompy zębate:
 - o zazębieniu zewnętrznym,
 - o zazębieniu wewnętrznym.
 - Pompy śrubowe.
 - Pompy łopatkowe:
 - z łopatkami wirującymi,
 - z łopatkami niewirującymi
2. Pompy o ruchu posuwisto-zwrotnym elementów wyporowych (wielotłoczkowe).

- Pompy promieniowe:
 - z tłoczkami wirującymi,
 - z tłoczkami niewirującymi.
- Pompy osiowe:
 - z wychylnym wirnikiem,
 - z wychylną tarczą.

W zależności od możliwości zmiany wydajności podczas pracy, możemy dokonać następującego podziału pomp:

1. Pompy o stałej wydajności.
2. Pompy o zmiennej (nastawialnej) wydajności.

Możliwość zmiany wydajności podczas pracy pompy związana jest z koncepcją jej rozwiązania konstrukcyjnego i rozpatrywana jest wyłącznie przy stałej prędkości obrotowej wałka napędowego. Tak, więc pompy zębate i śrubowe budowane są wyłącznie jako jednostki o stałej wydajności, natomiast pozostałe typy pomp mogą być budowane w obu wariantach, a więc o stałej lub o zmiennej (nastawialnej) wydajności.

Na zagadnienie zmiany wydajności można spojrzeć także z innego punktu widzenia dopuszczając zmianę prędkości obrotowej silnika napędzającego pompę. Biorąc pod uwagę stosunkowo łatwą zmianę prędkości obrotowej silników elektrycznych sterowanych falownikami, z każdej pompy możemy w praktyce uczynić jednostkę o zmiennej wydajności. Jest to dopuszczalne pod warunkiem, że zmiana prędkości obrotowej będzie się odbywała w zakresie określonym przez producenta i podawanym w katalogu firmowym.





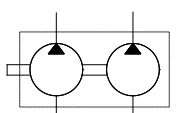
Przyjmując jako kryterium podziału liczbę niezależnych strumieni cieczy, pompy możemy podzielić na dwie grupy:

1. Pompy jednostrumieniowe.
2. Pompy wielostrumieniowe.

Pompy wielostrumieniowe służą do niezależnego zasilania różnych obwodów hydraulicznych lub do zasilania tego samego obwodu w celu uzyskania stopniowanej zmiany prędkości roboczych silnika hydraulicznego lub siłownika. Wydajności poszczególnych sekcji mogą być jednakowe lub zróżnicowane.

Tabela 8.1 przedstawia symbole graficzne pomp wyporowych. Symbole te są używane do oznaczania pomp w schematach napędów hydraulicznych.

Tabela 8.1. Symbole graficzne pomp wporowych

Symbol graficzny	Nazwa i opis elementu	
	Pompa o stałej wydajności	o stałym kierunku tłoczenia
		o zmiennym kierunku tłoczenia
	Pompa o zmiennej wydajności	o stałym kierunku tłoczenia, bez precyzowania sposobu zmiany wydajności
		o zmiennym kierunku tłoczenia, bez precyzowania sposobu zmiany wydajności
	Pompa dwustrumieniowa	złożona z jednakowych jednostek o stałej wydajności

8.2.3. Silniki wporowe

Zadaniem silnika wporowego, nazywanego najczęściej silnikiem hydraulicznym, jest zamiana energii ciśnienia cieczy na energię mechaniczną ruchu obrotowego. Zasada działania silnika jest odwróceniem zasady działania pompy wporowej. Rzecz polega na doprowadzeniu cieczy pod ciśnieniem do komór wporowych, które mogą zmieniać swoją objętość przez wymuszenie ruchu elementów wporowych. Z kolei ruch tych elementów zamieniany jest na ruch obrotowy wałka wyjściowego silnika. Ciecz, która oddała swoją energię elementom wporowym silnika jest odprowadzana do zbiornika.

Silniki, podobnie jak pompy, można klasyfikować w różnorodny sposób, na przykład ze względu na:

- rozwijane prędkości i momenty obrotowe,
- rodzaj ruchu elementów wporowych,
- możliwość zmiany chłonności.

Kryterium prędkości i momentów obrotowych ma zasadnicze znaczenie. Zgodnie z nim możemy wyróżnić dwie podstawowe grupy silników:

1. Silniki szybkoobrotowe niskomomentowe.

2. Silniki wolnoobrotowe wysokomomentowe.

Tabela 8.2. Prędkości obrotowe silników wporowych

Rodzaje silników	Zakresy prędkości obrotowych [obr/min]	
	n_{\min}	n_{\max}
Szybkoobrotowe	300 ÷ 500	3000
Wolnoobrotowe	1	150 ÷ 200

Silniki szybkoobrotowe charakteryzują się najczęściej takimi samymi lub zbliżonymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i parametrami pracy jak pompy, więc ich klasyfikacje mogą być podobne jak dla pomp. Silniki te nadają się również do pracy pompowej, przy czym sposób tej pracy jest zwykle określany przez producenta w danych katalogowych.

Klasyfikacja silników szybkoobrotowych, wynikająca z danych katalogowych, ze względu na rodzaj ruchu elementów wporowych jest następująca:

1. Silniki o ruchu obrotowym elementów wporowych (rotacyjne):
 - Silniki zębate.
 - Silniki łopatkowe.
2. Silniki o ruchu posuwisto-zwrotnym elementów wporowych (wielotłoczkowe):
 - Silniki osiowe.

Silniki wolnoobrotowe są stosowane stosunkowo często, gdyż ich wałki można bezpośrednio sprzęgać z wałkami maszyn bez pośrednictwa przekładni mechanicznych zmniejszających prędkości obrotowe. Silniki te są na ogół konstrukcjami specjalnymi nienadającymi się do pracy pompowej, a ich klasyfikacja ze względu na rodzaj ruchu elementów wporowych przedstawia się następująco:

1. Silniki o ruchu obrotowym elementów wporowych (rotacyjne):
 - Silniki zębate.
2. Silniki o ruchu posuwisto-zwrotnym elementów wporowych (tłokowe):
 - Silniki promieniowe.
 - Silniki osiowe.

Każdy silnik wporowy ma trzy podstawowe parametry ruchowe decydujące o przydatności w konkretnym układzie hydrostatycznym, mianowicie:

- chłonność nominalna,
- ciśnienie nominalne,
- moc nominalna.

Chłonnością silnika nazywamy ilość cieczy roboczej pobranej z przewodu tłocznego w jednostce czasu. Chłonnością nominalną nazywamy chłonność przy nominalnej prędkości obrotowej i nominalnym ciśnieniu.









Ciśnienie w układzie jest wytwarzane przez pompę, lecz jego wartość zależy od obciążenia silnika, koncepcji jego rozwiązania konstrukcyjnego i wymiarów,

sprawności hydrauliczno-mechanicznej oraz strat ciśnienia w przewodach i elementach układu.

Mocą nominalną nazywamy moc dla nominalnej chłonności i nominalnej różnicy ciśnień w silniku, jest to również moc dla nominalnego momentu obrotowego i nominalnej prędkości obrotowej.

Tabela 8.3 przedstawia symbole graficzne silników wyporowych. Symbole te są używane do oznaczania silników wyporowych na schematach napędów hydraulicznych.

Tabela 8.3. Symbole graficzne silników wyporowych

Symbol graficzny	Nazwa i opis silnika	
	Silnik o stałej chłonności	o stałym kierunku obrotów
		o zmiennym kierunku obrotów
	Silnik o zmiennej chłonności	o stałym kierunku obrotów
		o zmiennym kierunku obrotów
	Pompa - silnik o stałej chłonności	o stałym kierunku tłoczenia/obrotów
		o zmiennym kierunku tłoczenia/obrotów
	Pompa - silnik o zmiennej chłonności	o stałym kierunku tłoczenia/obrotów
		o zmiennym kierunku tłoczenia/obrotów

8.2.4. Siłowniki

Siłowniki, nazywane również cylindrami hydraulicznymi, należą również do grupy silników wyporowych. W siłownikach energia ciśnienia cieczy roboczej zamieniana jest na energię mechaniczną pod postaciami:

- ruchu prostoliniowo-zwrotnego,
- ruchu obrotowo-zwrotnego, czyli obrotowego o ograniczonym kącie obrotu.

Siłowniki można klasyfikować w różnorodny sposób, na przykład według liczby komór roboczych, czy ze względu na stosowane rozwiązania konstrukcyjne.

Ze względu na liczbę komór (przestrzeni) roboczych siłowniki klasyfikujemy następująco:

1. Siłowniki dwustronnego działania, mające dwie lub więcej komór roboczych.
2. Siłowniki jednostronnego działania, mające jedną komorę roboczą.

Siłowniki dwustronnego działania wykonują ruch roboczy (najczęściej wysuw) i ruch powrotny (najczęściej wsuw) pod działaniem cieczy pod ciśnieniem doprowadzanej do tych komór roboczych, które mogą zwiększać swoją objętość. Odprowadzenie cieczy następuje z tych komór, które mogą zmniejszać swoją objętość.

Siłowniki jednostronnego działania wykonują ruch roboczy (wysuw) pod działaniem cieczy pod ciśnieniem, doprowadzonej do komory roboczej. Ruch powrotny (wsuw) może być wykonany pod wpływem siły ciężkości lub siły sprężyny, podczas tego ruchu ciecz jest odprowadzana z komory roboczej do zbiornika.

Ze względu na stosowane rozwiązania konstrukcyjne można zaproponować następującą klasyfikację siłowników dwustronnego działania:

1. Siłowniki o ruchu prostoliniowo-zwrotnym:
 - Siłowniki jednoczyskowe.
 - Siłowniki dwuczyskowe.
 - Siłowniki wielotłokowe.
 - Siłowniki teleskopowe.
2. Siłowniki o ruchu obrotowo-zwrotnym, inaczej siłowniki wahliwe, czyli o ograniczonym kącie obrotu:
 - Siłowniki z tłokiem obrotowym.
 - Siłowniki z mechanizmem wahliwym.
 - Siłowniki śrubowe.

Ze względu na stosowane rozwiązania konstrukcyjne można zaproponować następującą klasyfikację siłowników jednostronnego działania:

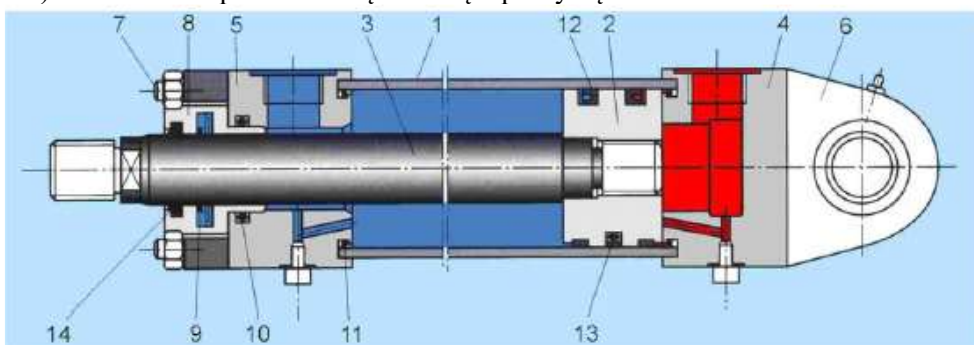
- Siłowniki nurnikowe.
- Siłowniki tłokowe.
- Siłowniki teleskopowe.

Na rys.8.16 pokazano schemat siłownika **jednoczyskowego**. Zasadniczymi elementami siłownika są: tłok 2 umieszczony w cylindrze 1 i tłoczący 3 współpracujący z tuleją prowadzącą 8, całość skręcona jest czterema długimi śrubami 7 łą-

częściami pokryw 4 i 5. Poszczególne części siłownika są odpowiednio uszczelnione, mianowicie:

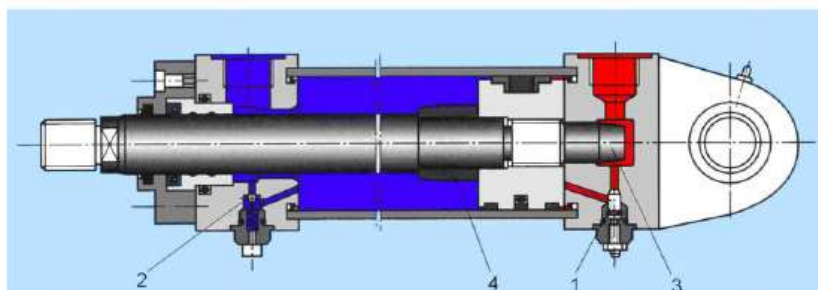
- tłok 2 jest uszczelniony w cylindrze 1; na rysunku pokazano dwa przykładowe warianty uszczelnienia: za pomocą pierścieni 12 lub 13,
- cylinder 1 jest uszczelniony w pokrywach 4 i 5 pierścieniami 11,
- tłoczek 3 jest uszczelnione w tulei prowadzącej 8 pierścieniem 9,
- tuleja prowadząca 8 i pokrywa 5 są uszczelnione pierścieniem 10.

Ponadto tuleja prowadząca 8 jest wyposażona w pierścień zgarniający 14 zabezpieczający przed przedostawaniem się zanieczyszczeń do wnętrza siłownika. Ważnym zagadnieniem występującym podczas pracy siłowników są uderzenia tłoka 2 o pokrywę 4 lub 5 w końcowych fazach pracy tłoka 2 wykonującego ruchy na całej długości skoku. Uderzenia te są tym silniejsze, im większa jest prędkość ruchu tłoka 2 i im większe są masy z nim związane. Przyjmuje się, że przy prędkościach przekraczających 0.1[m/s] niezbędne jest zastosowanie hamowania (tłumienia) ruchu tłoka 2 przed zetknięciem się z pokrywą 4 lub 5.



Rys.8.16. Schemat siłownika jednotłoczkowego: 1 - cylinder, 2 - tłok, 3 - tłoczek, 4, 5 - pokrywy, 6 - ucho, 7 - śruba, 8 - tuleja prowadząca, 9, 10, 11, 12, 13 - pierścienie uszczelniające, 14 - pierścień zgarniający

Na rys. 8.17 przedstawiono schemat siłownika z obustronnym nastawnym tłumieniem ruchu w skrajnych położeniach tłoka. W pokazanym rozwiązaniu zastosowano czopy 3 i 4 współpracujące z otworami w pokrywach, a ponadto w każdej z pokryw zastosowano zespół dławiąco-zwrotny, złożony z zaworu dławiącego 1 i zwrotnego 2 (na rysunku pokazano po jednym elemencie z każdego zespołu).



Rys.8.17. Schemat siłownika jednotłoczkowego z obustronnym tłumieniem ruchu w skrajnych położeniach tłoka: 1 - zawór dławiący, 2 - zawór zwrotny, 3,4- czop

Rys.8.18 pokazuje dokładniejszy schemat omawianego sposobu tłumienia ruchu. Zakładając, że tłok 1 porusza się w prawo możemy stwierdzić, iż pod koniec ruchu tłoka 1 występuje:

- zamknięcie przez czop 2 otworu w pokrywie 3,
- odcięcie swobodnego wypływu cieczy z komory 4 i wymuszony przepływ kanałem 5 pod grzybek 7 zaworu dławiącego,
- wytworzenie w komorze 4 ciśnienia hamującego, wynikającego z odległości grzybka 7 od gniazda.

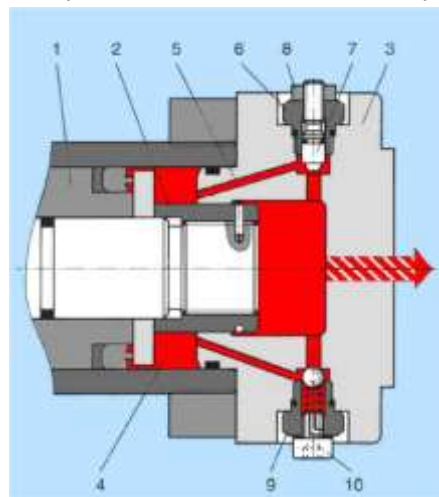
W ten sposób nadmierna energia kinetyczna tłoka i związanych z nim elementów ruchomych zostaje zużyta na przetłaczanie cieczy w zaworze dławiącym.

Dla ułatwienia i przyspieszenia rozruchu tłoka 1 w lewo stosuje się zawór zwrotny w korpusie 9 umożliwiającą z bocznikowanie dławika 7.

Charakterystyczną cechą siłowników jednotłoczkowych jest zależność ich właściwości od kierunku ruchu tłoka. Zakładając identyczne warunki zasilania dla wysuwu i wsuwu, możemy zauważyć, że:

- siła rozwijana podczas wysuwu jest większa od siły podczas wsuwu,
- prędkość rozwijana podczas wysuwu jest mniejsza od prędkości podczas wsuwu.

Rys.8.18. Schemat tłumienia ruchu w skrajnym położeniu tłoka: 1 - tłok, 2 - czop, 3 - pokrywa, 4 - komora tłumika, 5 - kanał wewnętrzny, 6 - korpus zaworu dławiącego, 7 - grzybek zaworu dławiącego, 8 - przeciwnakrętka, 9 - korpus zaworu zwrotnego, 10 - odpowietrznik



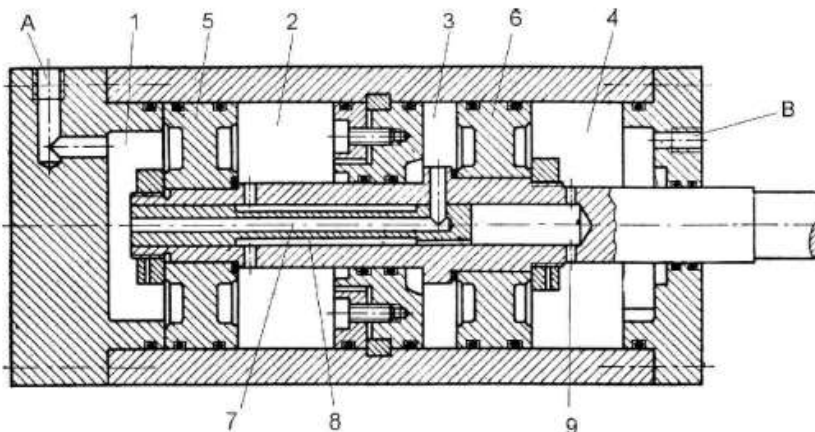
Siłowniki dwutłoczkowe wykonuje się najczęściej w wersji z tłoczkami o jednakowych średnicach. Takie siłowniki mają jednakowe powierzchnie czynne,

co umożliwia uzyskanie jednakowych prędkości ruchu tłoka w obu kierunkach. Jest to ważna zaleta siłowników, predysponująca je do zastosowania w układach automatyki lub na przykład w obrabiarkach (szlifierkach).

Siłowniki o większej liczbie komór roboczych i większej liczbie tłoków są spotykane znacznie rzadziej niż typowe siłowniki dwukomorowe jednotłoczkowe lub dwutłoczkowe. **Siłowniki wielotłokowe** znajdują zastosowanie w następujących przykładowych sytuacjach:

- niezależne przeciwbieżne ruchy tłoków,
- zależne przeciwbieżne ruchy tłoków,
- zwiększenie rozwijanej siły.

Na rys.8.19 przedstawiono siłownik czterekomorowy z dwoma tłokami na wspólnym tłoczysku. Siłownik ten umożliwia uzyskanie dużej siły przy stosunkowo małej średnicy i małym skoku. Załóżmy, że ciecz pod ciśnieniem podawana jest do przyłącza A. Z tego przyłącza zasilana jest komora 1 i za pomocą kanału 7 komora 3. Jednocześnie ciecz z komory 2 odprowadzana jest kanałami 8 i 9 do komory 4, a razem z komór 2 i 4 przyłączem B do zbiornika. Tłoki 5 i 6 wykonują wspólny ruch w prawo. Ponieważ ciśnienie cieczy działa jednocześnie na tłoki 5 i 6, więc uzyskane siły się sumują. Po zamianie przyłącza zasilającego A ze spływowym B siłownik zmienia kierunek ruchu.

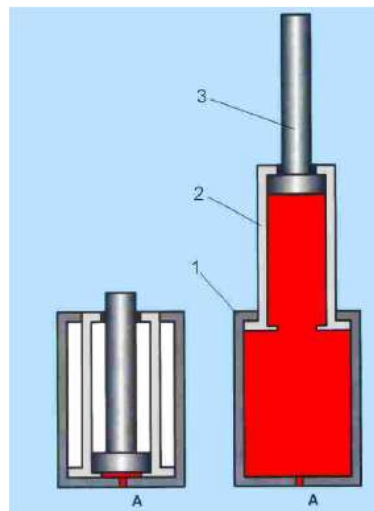


Rys.8.19. Siłownik z dwoma tłokami na wspólnym tłoczysku: 1,2,3,4- komory, 5, 6 - tłoki, 7, 8, 9 - kanały, A, B - przyłącza

Siłowniki teleskopowe umożliwiają uzyskanie dużego skoku, znacznie przekraczającego długość siłownika. Efekt ten uzyskuje się kosztem zwiększonej średnicy siłownika. Siłownik taki składa się z kilku cylindrów, o coraz mniejszej średnicy, zmontowanych jeden w drugim i kolejno się wysuwających, tłok siłownika znajduje się w cylindrze o najmniejszej średnicy. Wartość czynnej powierzchni tłoka decyduje o maksymalnej wartości rozwijanej siły. Zasadę pracy siłownika jednostronnego działania ilustruje rys.8.20. Po podaniu cieczy pod ciśnieniem do

przyłącza A najpierw wysuwa się cylinder 2 wraz z tłokiem 3, a następnie sam tłok 3. Połączenie przyłącza A ze zbiornikiem spowoduje najpierw ruch tłoka 3, a następnie ruch cylindra 2 wraz z tłokiem 3.

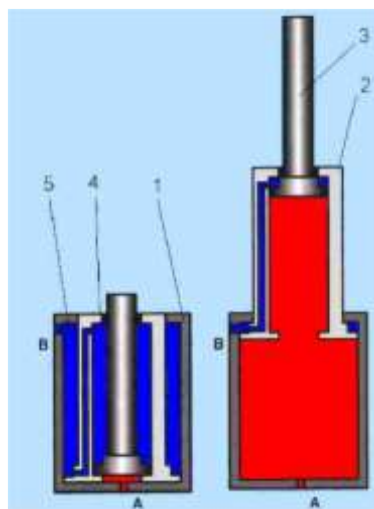
Rys.8.20. Zasada pracy siłownika teleskopowego jednostronnego działania: 1,2- cylindry, 3 - tłok, A – przyłączy



Siłowniki teleskopowe dwustronnego działania spotyka się na ogół rzadko, a zasadę ich działania ilustruje rys.8.21. Doprowadzenie cieczy do przyłącza A spowoduje, najpierw wysunie się cylinder 2 wraz z tłokiem 3, a następnie samego tłok 3. Ciecz z komór 4 i 5 odprowadzana jest do przyłącza B a z niego do zbiornika. Doprowadzenie cieczy do przyłącza B spowoduje najpierw ruch tłoka 3, a następnie cylindra 2 wraz z tłokiem 3, ciecz będzie wtedy odprowadzana przyłączem A do zbiornika. Siłowniki teleskopowe mają wadę ujawniającą się przy stałym natężeniu dopływającej cieczy i stałym obciążeniu:

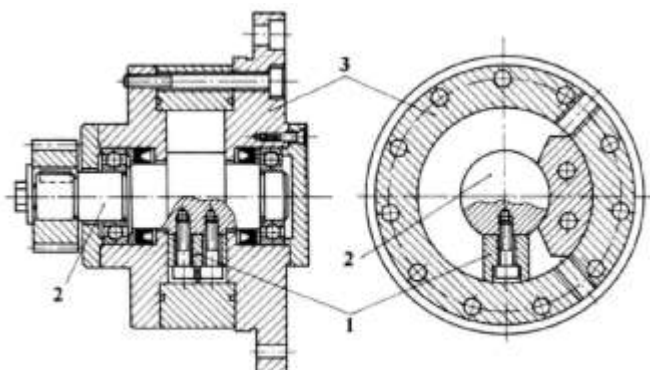
- rozpoczęciu wysuwu każdego kolejnego stopnia towarzyszy skokowe zmniejszenie czynnej powierzchni, a więc skokowy wzrost rozwijanej prędkości,
- rozpoczęciu wysuwu każdego kolejnego stopnia towarzyszy skokowy wzrost ciśnienia, spowodowany skokowym zmniejszeniem się czynnej powierzchni.

Rys.8.21. Zasada, pracy siłownika teleskopowego dwustronnego działania: 1,2- cylindry, 3 - tłok, 4, 5 - komory, A, B - przyłączy



Siłowniki wahliwe z tłokiem obrotowym

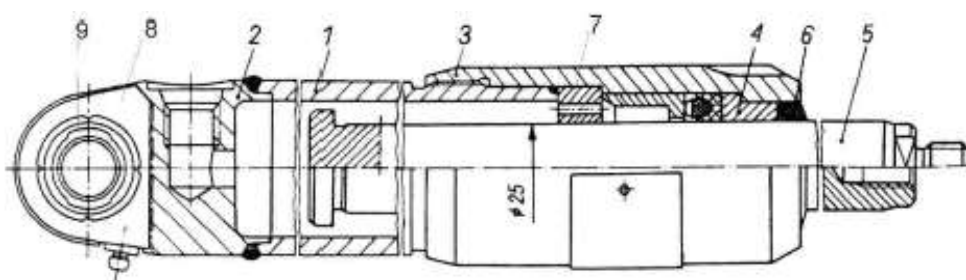
Siłowniki wahliwe umożliwiają bezpośrednią zamianę siły działającej na tłok na moment obrotowy na wale, zamiana ta odbywa się w ramach ograniczonego kąta obrotu. Na rys.8.22 pokazano siłownik wahliwy z obrotowym tłokiem, nazywanym również łopatką. Tłok 1 jest przymocowany śrubami do wałka 2, ułożyskowanego i uszczelnionego w korpusie 3.



Rys.8.22. Siłownik wahliwy z obrotowym tłokiem 1 - tłok (łopatką), 2 - wałek, 3 - korpus

Tłok 1 działa tak samo jak w siłownikach o ruchu prostoliniowo-zwrotnym, z tą różnicą, że wykonuje on wraz z wałkiem ruch obrotowy w zakresie nieprzekraczającym zwykle 320° . Siłowniki z jednym tłokiem nie są zrównoważone od siły promieniowej działającej na wałek. Zrównoważenie to można uzyskać stosując na przykład dwa tłoki, za cenę zmniejszenia kąta obrotu do około 140° .

Na rys.8.23 przedstawiono przykład rozwiązania konstrukcyjnego **siłownika nurnikowego**. Do cylindra 1 przyspawana jest pokrywa tylna 2, wyposażona w ucho 8 z wahliwą tuleją 9 do przegubowego zamocowania siłownika w maszynie roboczej. W pokrywie przedniej 3 usytuowano tuleje prowadzące 4 i 7, odległe od siebie tak, aby zrealizować podparcie nurnika 5 w dwóch miejscach dla zwiększenia sztywności siłownika. Nurnik 5 zakończony jest kołnierzem ograniczającym jego skok



Rys.8.23. Siłownik nurnikowy: 1 - cylinder, 2 - pokrywa tylna, 3 - pokrywa przednia, 4 - prowadnica, 5 - nurnik, 6 - pierścień zgarniający, 7 - prowadnica, 8 - ucho, 9 - tuleja wahliwa

Tabela 8.4. Symbole graficzne siłowników

Symbol graficzny	Nazwa i opis siłownika	
	Siłownik dwustronnego działania	jednotłoczyskowy bez tłumienia ruchu w skrajnych położeniach tłoka
		jednotłoczyskowy z nienastawnym tłumieniem ruchu w lewym skrajnym położeniu tłoka
		jednotłoczyskowy z nastawnym tłumieniem ruchu w obu skrajnych położeniach tłoka
		dwutłoczyskowy bez tłumienia ruchu w skrajnych położeniach tłoka
		dwutłoczyskowy z nienastawnym tłumieniem ruchu w obu skrajnych położeniach tłoka
		dwutłoczyskowy z nastawnym tłumieniem ruchu w obu skrajnych położeniach tłoka
		teleskopowy bez tłumienia ruchu w skrajnych położeniach cylindrów i tłoka
		wahliwy bez tłumienia ruchu w skrajnych położeniach
	Siłownik jednostronnego działania	teleskopowy bez tłumienia ruchu w skrajnych położeniach cylindrów i tłoka

8.3. Napęd pneumatyczny

Napęd ten stosowany jest w robotach o udźwigu do ok. 20kg (przy mocy od 60 do 800W dla jednego stopnia ruchliwości).

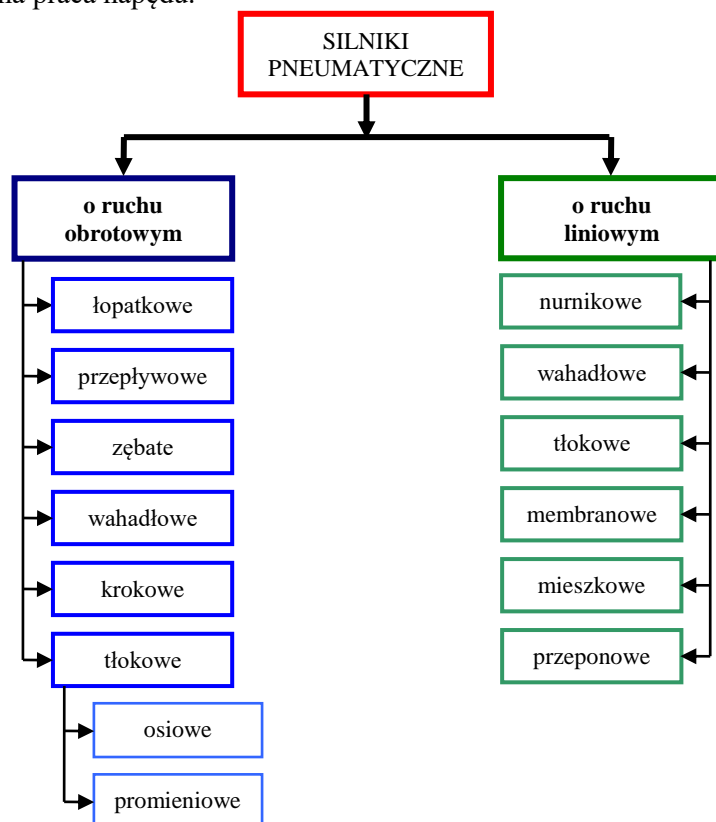
Zastosowanie tego typu napędu w robotach, związane jest z zaletami, jakie posiada ów napęd:

- dostępność i powszechność czynnika roboczego, jakim jest powietrze. Po wykorzystaniu zawartej w nim energii nie trzeba zwracać go do sieci,

- bezpieczeństwo i czystość w eksploatacji,
- możliwość pracy napędu w środowisku agresywnym i zagrożonym pożarem,
- duża prędkość działania (dla niektórych przypadków może to być wada),
- duży współczynnik sprawności (do 0.8),
- mały stosunek masy napędu do uzyskiwanej mocy,
- odporność na przeciążenia i wibracje,
- prosta i niezawodna konstrukcja
- duża trwałość i łatwość wymiany urządzeń.

Pomimo tak wielu zalet napęd ten nie znajduje tak wielkiego uznania i zastosowania. Jest to związane z wieloma wadami takimi jak:

- ściślność czynnika roboczego, która powoduje niestałość prędkości członu wyjściowego napędu przy zmianach obciążeń,
- ograniczona liczba punktów pozycjonowania (najczęściej dwa punkty) w napędach ze sterowaniem cyklicznym,
- konieczność wyhamowywania członu wyjściowego napędu w końcowej fazie ruchu, ponieważ przy dużych prędkościach jego uderzenie o zderzak powodowałoby znaczne przeciążenia dynamiczne,
- głośna praca napędu.

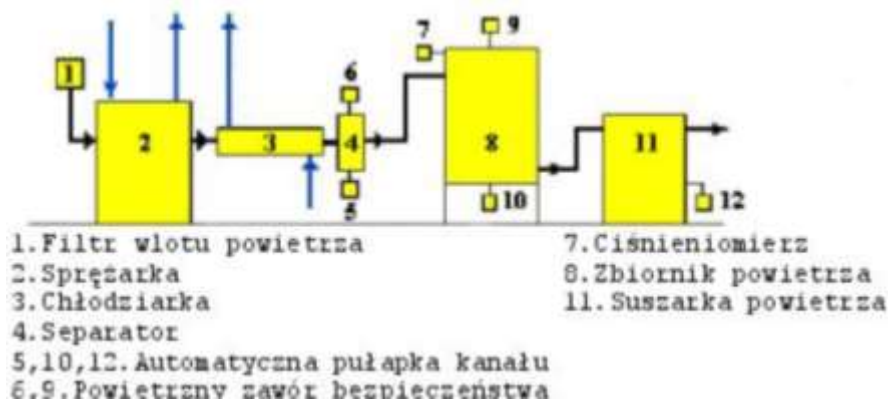


Rys. 8.24. Ogólna klasyfikacja silników pneumatycznych

Wykorzystanie sterowania ciągłego w napędach pneumatycznych umożliwiłoby rozwiązanie problemu pozycjonowania pneumatycznego. Dokładność pozycjonowania napędów pneumatycznych wynosi ok. 0,1mm przy pozycjonowaniu zderzakowym i < 0,1mm. Aktualnie wiele firm oferuje dobre i sprawdzone rozwiązania serwonapędów pneumatycznych, które można zastosować w konstrukcjach manipulatorów i robotów.

8.3.1. Elementy układu pneumatycznego

Napęd pneumatyczny wymaga układu przygotowującego sprężone powietrze dla układów wykonawczych. W przedsiębiorstwach wykorzystujących sprężone powietrze jako czynnik napędowy znajdują się często specjalne wydziały z pompami i sprężarkami zajmujące się wyłącznie przygotowaniem sprężonego powietrza. Schemat zespołu przygotowującej powietrze pokazany jest na rys.8.25.



Rys.8.25. Przykład układu pneumatycznego

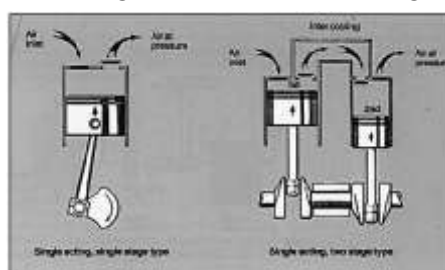
W skład typowego układu pneumatycznego wchodzi:

- sprężarka,
- system rozprowadzania (dystrybucji) powietrza,
- zespół przygotowania powietrza.

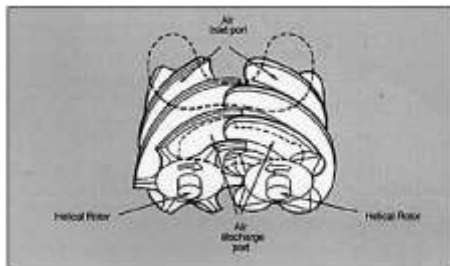
Zadaniem **sprężarki** jest przekształcić energię mechaniczną w energię sprężonego powietrza.

Typy sprężarek:

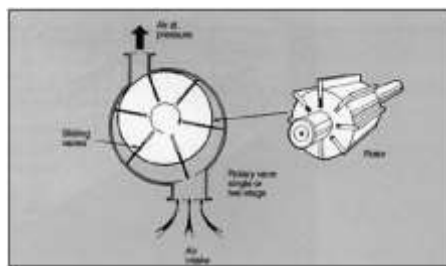
- tłokowe (rys.8.26),
- śrubowe (rys.8.27),
- łopatkowe (rys.8.28).



Rys.8.26. Sprężarka tłokowa



Rys.8.27. Sprężarka śrubowa



Rys.8.28. Sprężarka łopatkowa

System rozprowadzania (dystrybucji) powietrza

Jego zadaniem jest dostarczanie powietrza od zbiornika do miejsca docelowego w jak najbardziej efektywny sposób – bez strat ciśnienia. Systemowi temu stawia się wiele wymagań, które muszą być wzięte pod uwagę podczas jego projektowania.

Należą do nich:

- wewnętrzna średnica,
- ułożenie,
- połączenia elastyczne.

Zespoły przygotowania powietrza

Przed wprowadzeniem sprężonego powietrza do elementów roboczych musi ono być odpowiednio przygotowane. Przygotowanie to polega na:

- usunięciu zanieczyszczeń,
- redukcji ciśnienia do wymaganego poziomu,
- wprowadzeniu czynnika smarnego.

W celu uniknięcia uszkodzeń elementów roboczych spowodowanych zanieczyszczeniami znajdującymi się w powietrzu roboczym powietrze to jest filtrowane. Stosuje się wiele sposobów filtrowania, z których najczęściej stosowane są:

- filtrowanie mechaniczne – przepuszczanie powietrza przez siatkę, która zatrzymuje grubsze zanieczyszczenia (rys.8.29 a),
- filtrowanie adsorbcyjne – kondensacja drobnych cząstek w większe i ich wydalanie (rys.8.29 b),
- filtrowanie absorbcyjne – pochłanianie zanieczyszczeń przez chemiczny związek filtrujący (rys.8.29 c).



Rys.8.29. Podstawowe metody filtrowania powietrza

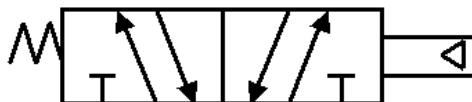
W celu zmniejszenia oporów ruchu w elementach wykonawczych niezbędne jest ich smarowanie. W urządzeniach pneumatycznych smar podawany jest wraz ze sprężonym powietrzem. W celu wprowadzenia do sprężonego powietrza określonej ilości substancji smarnej stosuje się specjalne **smarownice** (rys.8.30).



Rys.8.30. Smarownica

8.3.2. Elementy sterujące

W celu realizacji założonego programu pracy niezbędne są elementy sterujące przepływem sprężonego powietrza. To właśnie zadanie spełniają **zawory**. Zawory to urządzenia sterujące kierunkiem przepływu, ciśnieniem i natężeniem przepływu. Zawory sterujące kierunkiem przepływu nazywane są rozdzielaczami (rys.8.31).



Rys.8.31. Schemat zaworu rozdzielającego

Zależnie od konstrukcji dzielimy je na zawory:

- kontrolne,
- wahadłowe,
- sterujące ciśnieniem,
- dławiące,
- rozdzielające.

Zawory rozdzielające stanowią bardzo rozbudowaną grupę urządzeń, ponieważ w zależności od rodzaju aplikacji, w jakiej mają być stosowane stawiane są im inne wymagania. Oznaczenie i sposób ich sterowania przedstawia *tab.8.5*.

Tabela 8.5. Oznaczenie i sposób sterowanie zaworami rozdzielaczami

Oznaczenie	Sposób sterowania
	Sprężyna
	Ręczny
	Naciśnięcie guzika
	Dźwignia
	Mechaniczny
	Solenoid
	Pilot powietrzny
	Pilot powietrzny zmienny
	Zapadka

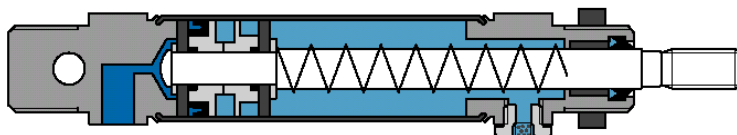
8.3.3. Siłowniki i silniki

Zadaniem **siłownika** pneumatycznego jest przekształcić energię sprężonego powietrza w energię mechaniczną.

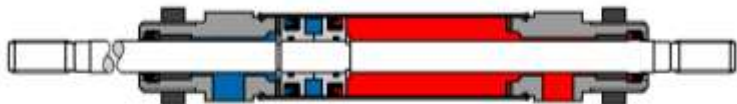
W zależności od przyjętego kryterium siłowniki dzielimy na:

- jednostronnego działania (rys.8.32a),
- dwustronnego działania (rys.8.32b),

a)



b)



Rys.8.32. Siłowniki a) jednostronnego działania, b) dwustronnego działania

- o ruchu postępowym (rys.8.33),
- o ruchu obrotowym (rys.8.34),

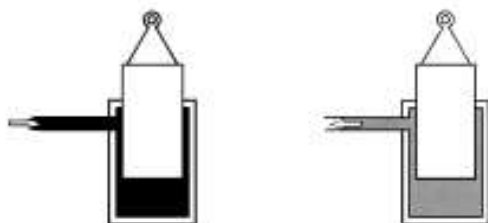


Rys.8.33. Siłownik o ruchu postępowym

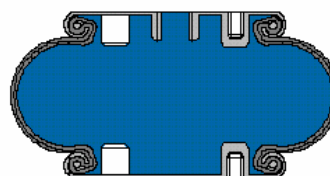


Rys.8.34. Siłownik o ruchu obrotowym

- tłokowe,
- nurnikowe (rys.8.35),
- membranowe,
- mieszkowe (rys.8.36),
- workowe,
- dętkowe.



Rys.8.35. Siłowniki nurnikowe

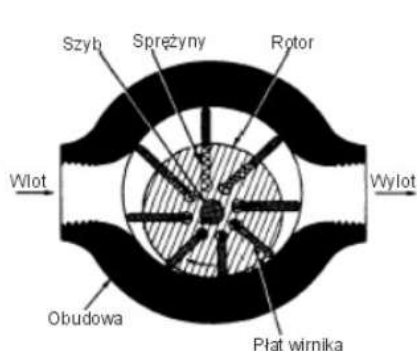


Rys.8.36. Siłownik mieszkowy

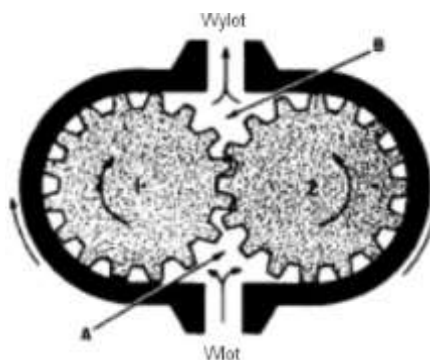
Zadaniem **silnika** pneumatycznego jest przekształcenie energii sprężonego powietrza w energię ruchu obrotowego.

Rodzaje silników pneumatycznych:

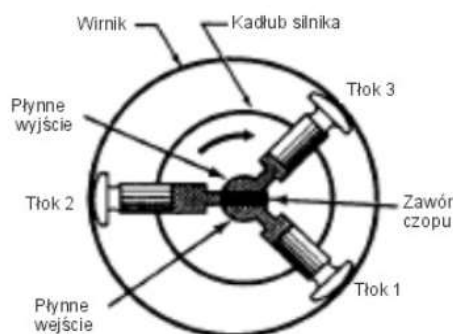
- łopatkowe (rys.8.37),
- zębate (rys.8.38),
- tłokowe (rys.8.39).



Rys.8.37. Silnik łopatkowy



Rys.8.38. Silnik zębatkowy



Rys.8.39. Silnik tłokowy

8.4. Charakterystyki pozycjonowania

8.4.1. Metody badań charakterystyk funkcjonalnych

Pełny program prób funkcjonalnych obejmuje badania: kinematyczne, dynamiczne i eksploatacyjne. Naszym głównym zainteresowaniem będą badania kinematyczne, jako że zagadnienia związane z dokładnością pozycjonowania dotyczą głównie parametrów geometrycznych robotów.

Analiza i badania struktur mechanicznych robotów przemysłowych zmierzają do ustalenia nowych rozwiązań, gwarantujących zwiększenie dokładności pozycjonowania i orientacji. Problemy w osiągnięciu dużej dokładności, porównywalnej np. z obrabiarkami, wynikają przede wszystkim z większej podatności statycznej oraz dynamicznej manipulatorów i robotów. Poprawa tych parametrów to głównie prace nad układami napędowymi. Dobry rozruch i hamowanie, dokładne pozycjonowanie, stabilność, dobra sterowność i niska cena to cechy, którymi powinien odznaczać się współczesny napęd.

Dokładność pozycjonowania w zadanym kierunku, jest najbardziej eksponowana przez producentów robotów przemysłowych. Na parametry te zawsze zwraca

się uwagę klienta i poddaje jego ocenie. Służą, więc one do pierwszej, wstępnej oceny dokładności robota.

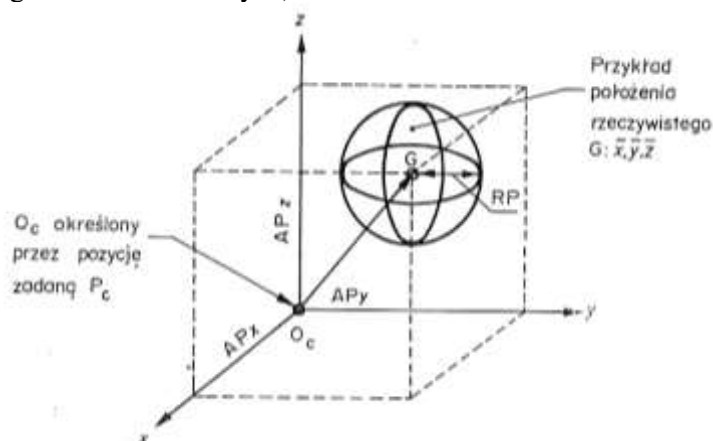
Błąd pozycjonowania wyznacza się dla różnych warunków pracy maszyny manipulacyjnej po wykonaniu określonego cyklu przemieszczeń, przy różnych obciążeniach, zakresach przemieszczeń i prędkościach. Pomiarów tych błędów należy dokonywać po osiągnięciu stabilności cieplnej, gdyż w fazie początkowej wartości błędów zależą od temperatury zespołów ruchu jednostki kinematycznej. Jest to szczególnie ważne dla maszyn z napędem hydraulicznym, gdzie taka stabilizacja osiągnięta jest nawet po paru godzinach pracy.

8.4.2. Parametry dokładności robotów przemysłowych

Jednokierunkowa dokładność pozycjonowania (AP) wyraża różnicę pomiędzy pozycją zadaną a średnią pozycją uzyskaną podczas wielokrotnego na nią najjeżdżania z tego samego kierunku. **Jednokierunkowa powtarzalność pozycjonowania** robota przemysłowego określa stopień zgodności pomiędzy kolejnymi osiąganymi pozycjami po n najjazdach do określonego punktu (np. X_c, Y_c, Z_c) z tego samego kierunku.

Zależnie od rodzaju ruchów dokładność pozycjonowania jednokierunkowego może być określona jako:

- różnica między położeniem zadanym a punktem będącym środkiem zbioru punktów przestrzeni roboczej (tzn. dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych) rys.8.40.
- różnica między zadaną orientacją kontową a średnią wartością zbioru rzeczywistych orientacji kątowych (tzn. dokładność orientowania jednokierunkowego ruchów obrotowych).



Rys 8.40. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego

Dokładność pozycjonowania jednokierunkowego oblicza się według następujących wzorów:

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (8.1)$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

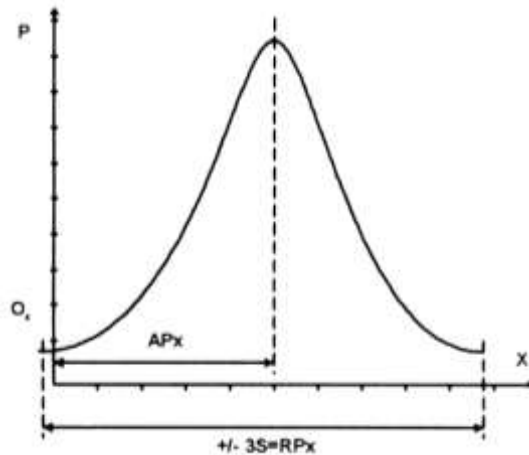
$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – współrzędne środka zbioru punktów przestrzeni roboczej uzyskanego przez n – krotne dochodzenie do położenia zadanego,

x_c, y_c, z_c – współrzędne położenia zadanego.

x_j, y_j, z_j – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j – tym dochodzeniu.

Można operować składowymi powyższych parametrów, tzn. AP_x, AP_y, AP_z oraz RP_x, RP_y, RP_z i przyjąć, że definicje te dotyczą orientacji (jednokierunkowej dokładności i powtarzalności pozycjonowania – wypadkowej względem jednej osi układu współrzędnych) robota przemysłowego. Jeśli rozrzut pozycji robota uwzględni się wg rozkładu Gaussa, to dokładność pozycjonowania można określić jako pozycję średnią, a powtarzalność jako przedział trzysigmowy, w którym zawiera się 99,7% osiągniętych pozycji (rys.8.41 – przy założeniu, że zadaną pozycją ma współrzędną zero).



Rys.8.41. Interpretacja parametrów AP i RP

Zmienność jednokierunkowej dokładności pozycjonowania jest wielkością charakteryzującą stopień zachowania stałej dokładności robota przemysłowego w określonym przedziale czasowym.

Zmienność dokładności w zależności od kierunku najazdu jest opisana z kolei jako różnica między uzyskiwanymi średnimi pozycjami podczas wielokrotnego najezdzania do danego punktu z trzech prostopadłych kierunków.

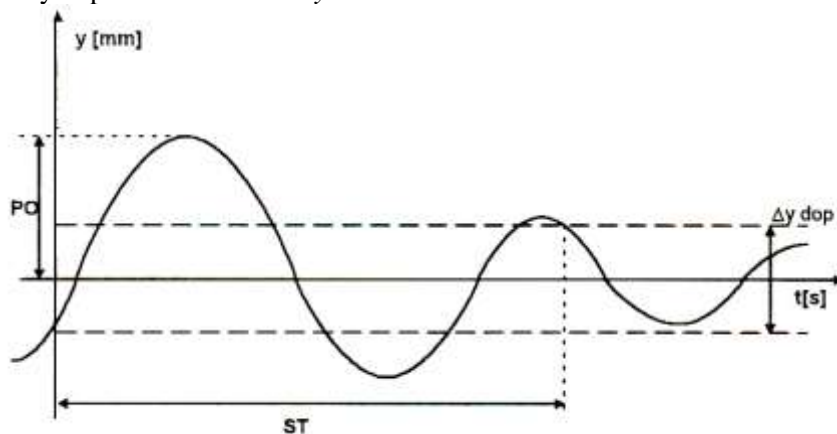
Dokładność odległości DA jest różnicą pomiędzy nominalną odległością dwóch punktów a średnią odległością uzyskaną podczas wielokrotnego najezdzania na zadane dwa punkty.

Powtarzalność odległości DR opisuje uzyskiwanych (identycznych) wartości przy wielokrotnym pokonywaniu odległości do dwóch zadanych punktów. Odpowiednikiem dokładności odległości jest dokładność orientacji (powtarzalność odległości obejmuje zarówno pozycjonowanie, jak i orientację). Parametry DA i DR są wykorzystywane w ocenie przydatności robotów przemysłowych w zastosowaniach technologicznych, których ważnym czynnikiem – wpływającym na jakość – jest zachowanie dokładności odległości.

Parametry przesterowania i czasu stabilizacji pozycji mają częściowo charakter dynamiczny odzwierciedlają, bowiem wpływ błędu dynamicznego na osiąganą dokładność statyczną.

Czas stabilizacji ST jest to okres pomiędzy wysłaniem przez robota sygnału potwierdzającego osiągnięcie pozycji a momentem jej zajęcia przez efektor końcowy w określonym przedziale wokół współrzędnych ją określających.

Przesterowanie pozycji PO jest maksymalną odchyłką uzyskanej pozycji od trajektorii dojścia, wyznaczoną po wysłaniu przez robota sygnału osiągnięcia pozycji. Parametry te przedstawiono na rys.8.42.



Rys. 8.42. Czas stabilizacji i przesterowania

Dokładność i powtarzalność trajektorii AT charakteryzuje zdolność robota do wielokrotnego przemieszczania efektora końcowego wzdłuż zadanej trajektorii w tym samym i przeciwnym kierunku. Jest to maksymalna różnica pomiędzy zadaną

trajektorią a linią będącą trajektorią średnią. Parametr AT ma swój odpowiednik dla orientacji.

Powtarzalność trajektorii RT wyraża stopień zgodności uzyskiwanych trajektorii podczas wielokrotnej ich realizacji. Odchyłki dotyczące zmiany kierunku ruchu CR i CD opisują zmiany trajektorii rzeczywistej względem zadanej. Parametry dokładności trajektorii ruchu robota stanowią podstawę jego oceny w zakresie zadań technologicznych związanych z prowadzeniem efektora końcowego wzdłuż zadanej trajektorii.

Do grupy parametrów dokładności prędkości zalicza się:

- dokładność prędkości – definiowaną jako różnica pomiędzy prędkością zaprogramowaną a jej średnią wartością uzyskiwaną podczas wielokrotnego przejścia wzdłuż zadanej trajektorii,
- powtarzalność prędkości oraz fluktuację prędkości – definiowaną jako maksymalna amplituda zmian prędkości podczas jednego przebiegu.

Parametry te odgrywają istotną rolę w pracy robota, np. w czynnej kontroli wymiarów lub montażu części znajdujących się na ruchomej taśmie.

Do pomiarów wymienionych parametrów stosuje się takie metody jak:

- triangulacja teodolitami,
- laserowe systemy śledzące,
- kamery wizyjne,
- pomiary czujnikowe z użyciem wzorców położenia i trajektorii.

Komputerowej oceny współrzędnych i trajektorii ruchu robota dokonuje się na podstawie następujących parametrów:

- pomiar dokładności pozycjonowania punktu należącego do robota (dokładność ta jest różnicą algebraiczną wyniku pomiaru położenia punktu robota w jego przestrzeni roboczej i wyniku pomiaru położenia punktu przyjętego jako punkt bazowy),
- pomiaru dokładności trajektorii przestrzennej (polegającego na pomiarze położenia punktu w czasie ruchu robota na realizowanej trajektorii w dowolnej chwili czasu),
- automatycznego, powtarzalnego pomiaru wg ustalonego cyklu, eliminującego wpływ człowieka na wyniki oceny,
- sprawdzeniu robota będącego cały czas w ruchu (flaying – start – finisz).

9. OGRANCZNIKI I PRZETWORNIKI RUCHU

Sterowanie ruchami manipulatora wymaga znajomości jego współrzędnych stanu. Do współrzędnych tych należą kąty obrotu ramion i chwytaków, przesunięcia ramion, kąty rozwarcia palców, prędkości liniowe i kątowe ramion, siły chwytu.

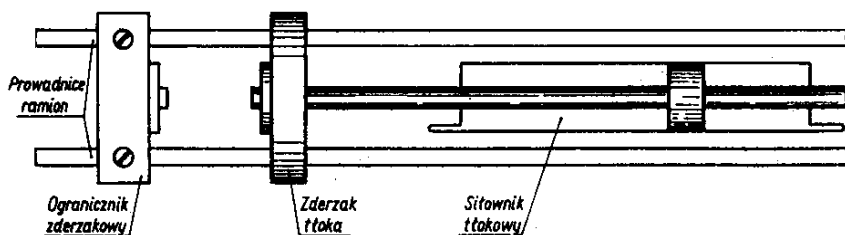
Informacja o wymienionych współrzędnych stanu robota jest zdobywana dwoma metodami:

- na drodze pasywnej, tzn. na drodze pomiaru danej współrzędnej za pomocą odpowiedniego przetwornika pomiarowego,
- na drodze aktywnej polegającej na wprowadzeniu do robota pewnej liczby urządzeń, najczęściej mechanicznych, które ograniczają bardzo duży zbiór możliwych wartości niektórych współrzędnych stanu do bardzo małego zbioru, o łatwo rozróżnialnych elementach. Urządzenia te nazywa się ogranicznikami.

Informacja o współrzędnych manipulowanych przedmiotów może być również zdobywana na drodze pasywnej (np. za pomocą przetworników obrazu) lub na drodze aktywnej (np. stosując podajniki ograniczające położenia przedmiotu do jednego możliwego, znanego z góry).

9.1. Ograniczniki zderzakowe i wyłączniki drogowe

Roboty o napędach pneumatycznych nie mają z reguły przetworników do pomiaru położenia ramion, lecz wyłącznie **ograniczniki zderzakowe** ruchu posuwistego lub obrotowego. Ograniczniki te są nastawiane ręcznie przy użyciu podziałki liniowej lub kątowej sprzęgniętej z ramieniem manipulatora. Ograniczniki te składają się z ruchomego suwaka, dającego się przesuwać wzdłuż podziałki *rys.9.1*, i nieruchomego zderzaka. Punkt zamocowania suwaka określa krańcowe położenie ramienia.



Rys.9.1. Ogranicznik zderzakowy

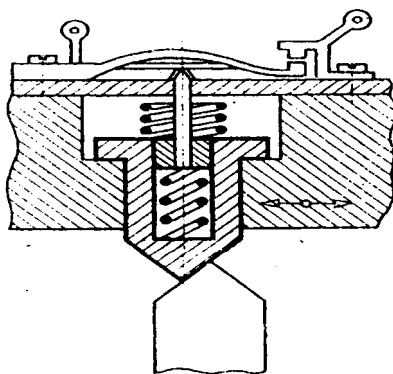
Błąd pozycjonowania za pomocą ograniczników:

$$s = \frac{F}{c} \tag{9.1}$$

gdzie: F – siła oddziaływania napędu na zderzak
 c – współczynnik sprężystości zderzaka i suwaka

Stosując ograniczniki zderzakowe można uzyskać bardzo duże dokładności ustawiania, rzędu 0,01mm.

Wyłączniki drogowe generują sygnał elektryczny, hydrauliczny lub mechaniczny w przypadku przesunięcia się nad nimi odpowiedniego elementu wyzwalającego, np. kołka lub magnesu trwałego. Element wyzwalający jest przesuwny i można go, podobnie jak suwak-ogranicznik, ustawić w miejscu żadanego zatrzymania ramienia rys.9.2.



Rys.9.2. Schemat wyłącznika drogowego

Błąd s pozycjonowania w przypadku stosowania wyłączników drogowych zależy od:

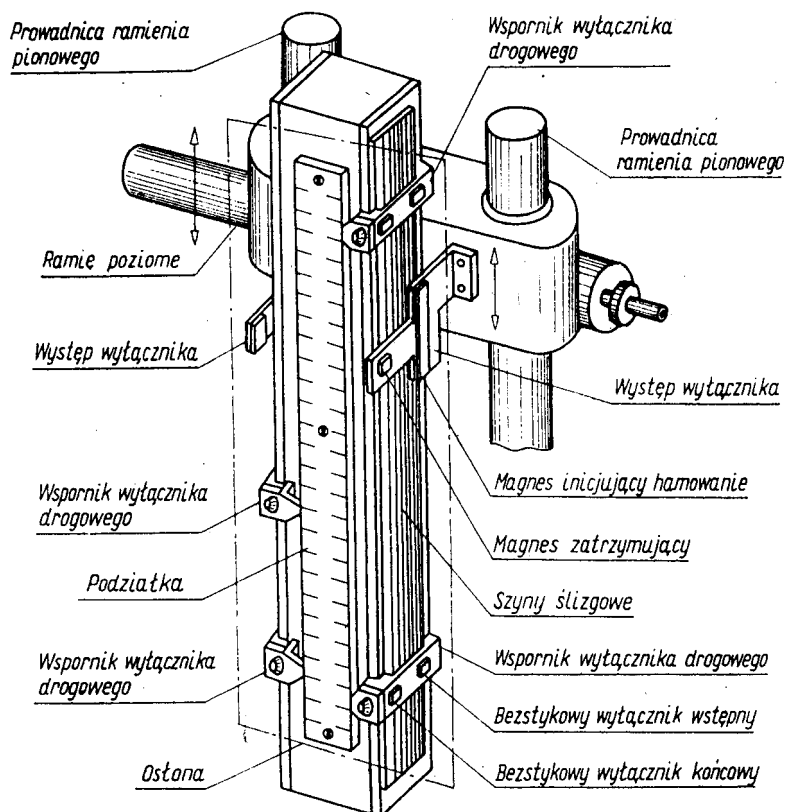
$$s = t_z v_0 + 0,5 \frac{mv_0^2}{F} \quad (9.2)$$

- czasu zwłoki (t_z) od chwili zadziałania wyłącznika do chwili wyłączenia napędu,
- prędkości ramienia manipulatora (v_0) w chwili zadziałania wyłącznika,
- wypadkowej masy (m) części poruszających się, sprowadzonej na ramię manipulatora,
- wypadkowej siły tarcia (F), sprowadzonej na ramię manipulatora.

Ponieważ błąd pozycjonowania wzrasta szybko ze zwiększeniem prędkości i masy m , w przypadku dużych prędkości i mas stosuje się parę wyłączników drogowych:

- wyłącznik wstępny, którego zadaniem jest wyznaczenie chwili rozpoczęcia hamowania,
- wyłącznik końcowy, którego zadaniem jest wyznaczenie chwili całkowitego zatrzymania silnika.

Rozwiązanie takie jest np. stosowane w robocie TRANSFER RBM-100 firmy TOSHIBA SEKI. Robot ten ma napędy hydrauliczne sterowane sekwencyjnie i udźwig 10kg. Manipulator tego robota jest dla ruchu posuwistego w pionie i ruchu obrotowego w poziomie wyposażony w komplet czterech par magnetycznych wyłączników drogowych. Na rys.9.3 przedstawiono rozmieszczenie tych wyłączników dla ruchu w pionie. Wyłączniki te znajdują się po przeciwnych stronach ramienia manipulatora parami na suwakach dających się przesuwac i ustawiac wzduż podziałki. Napięcie zasilające wyłączniki doprowadzone jest doprowadzone od spodu suwaków za pomocą szyn ślizgowych. Elementami wyzwalającymi są dwa nieruchome magnesy trwałe, z których dłuższy wyzwala wyłącznik wstępny, a krótszy – wyłącznik końcowy. Omówiony system umożliwi pozycjonowanie z dokładnością do 3mm.



Rys.9.3. Rozmieszczenie wyłączników drogowych na ramieniu manipulatora robota TRANS-RBM-100

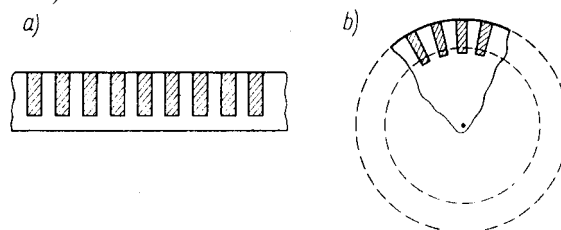
9.2. Przetworniki pomiaru położenia ramion

Zwiększenie dokładności pomiaru przesunięć i kątów obrotu można uzyskać metodą pomiarów cyfrowych. Cyfrowe pomiary przesunięć i kątów obrotu można podzielić na pomiary przyrostowe i pomiary bezwzględne. Wspólną cechą obydwu grup pomiarów jest to, że:

- Całkowity zakres zmian wielkości mierzonej zostaje podzielony na skończoną liczbę jednakowych podzakresów, zwanych przedziałami kwantowania. Celem pomiaru jest ustalenie, w którym z wymienionych przedziałów kwantowania znajduje się wartość wartości mierzonej.
- Różnica między pomiarem przyrostowym i pomiarem bezwzględnym polega na tym, że:
 - dla pomiarów przyrostowych przy zmianie wartości wielkości mierzonej, odpowiadającej jej przejściu z jednego przedziału kwantowania do sąsiadującego, przetwornik urządzenia pomiarowego generuje zawsze taki sam sygnał, niezależnie od wartości wielkości mierzonej,
 - dla pomiarów bezwzględnych każdemu przedziałowi kwantowania zostaje w sposób wzajemnie jednoznaczny przyporządkowany określony wektor informacji cyfrowej. Przyporządkowanie to jest określone kodem przetwornika.

9.2.1. Pomiary przyrostowe

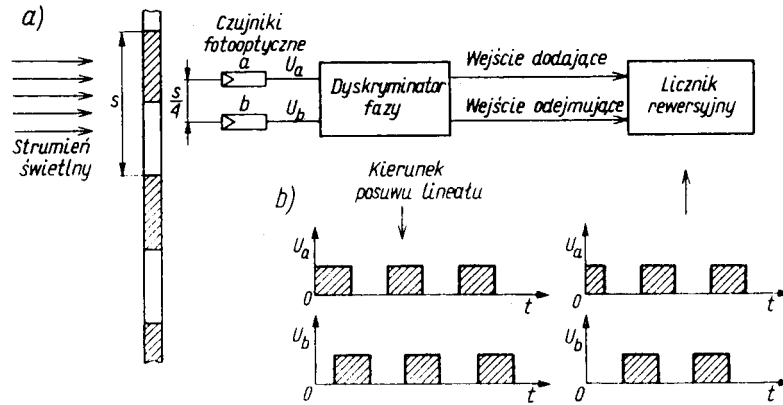
Podstawowym elementem urządzenia pomiarów przyrostowego jest liniał impulsowy lub tarcza impulsowa (rys.9.4) o długości lub obwodzie podzielonym na odcinki o jednakowej szerokości różniące się na przemian dwuwartościowymi właściwościami optycznymi (przepuszczalność lub nieprzepuszczalność światła) albo magnetycznymi (odcinki są na przemian magnesami trwałymi lub paramagnetykami). Szerokość odcinka odpowiada szerokości przedziału kwantowania. Obrót tarczy lub przesunięcie liniału o kąt lub długość odpowiadającą przedziałowi kwantowania pobudza parę przetworników fotoelektrycznych lub hallotronowych, przesuniętych względem siebie o długość równą połowie szerokości przedziału kwantowania (rys.9.5).



Rys.9.4. Liniał impulsowy (a) i tarcza impulsowa (b)

Zastosowanie dwóch przetworników umożliwia określenie kierunku obrotu tarczy lub ruchu liniału. Zależnie, bowiem od tego kierunku zmienia się faza impulsów

generowanych przez przetwornik. Na fazę tych impulsów reaguje dyskryminator fazy, który zależnie od fazy kieruje impulsy na wejście dodające lub odejmujące rewersyjnego licznika impulsów.

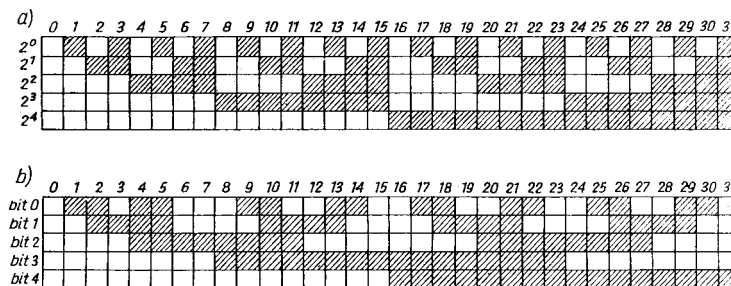


Rys.9.5. Zasada przyrostowego pomiaru przesunięcia (a) i przebiegi czasowe napięć z przetworników fotooptycznych (b)

9.2.2. Pomiary bezwzględne

Podstawowym elementem urządzenia pomiaru bezwzględnego jest **liniał kodowy** lub **tarcza kodowa**. Dla każdego przedziału kwantowania na liniał lub tarczę kodową naniesiony jest określony, tylko temu przedziałowi przyporządkowany binarny wzorec optyczny, magnetyczny lub elektryczny, przedstawiający wektor informacji cyfrowej odpowiadający temu przedziałowi. W przypadku rozwiązania optycznego, bity wektorów informacji cyfrowej przedstawione są polami przepuszczającymi lub nieprzepuszczającymi promienie świetlne, w przypadku rozwiązania magnetycznego – polami magnesów trwałych lub polami niemagnetycznymi, w przypadku rozwiązania elektrycznego – polami przewodzącymi lub nieprzewodzącymi prąd elektryczny. Najbardziej rozpowszechnione są rozwiązania optyczne. Na rys.9.6 przedstawiono liniały kodowe z dwoma różnymi kodami:

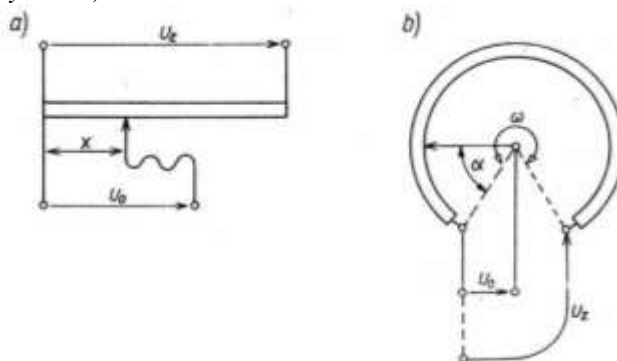
- kodem binarnym prostym rys.9.6a,
- kodem Graya rys.9.6b.



Rys.9.6. Liniały kodowe z kodem a) binarnym prostym, b) Graya

9.2.3. Przetworniki potencjometryczne

Napięcie wyjściowe jest funkcją wartości wielkości mierzonej, będącej kątem obrotu lub przesunięciem suwaka. Zależnie od rodzaju przetwarzanego przemieszczenia styku ślizgowego (suwaka) rozróżnia się potencjometry liniowe (rys.9.7a) lub obrotowe (rys.9.7b)



Rys.9.7. Potencjometr: a) liniowy, b) obrotowy

U_z – napięciem zasilającym o stałej wartości.

U_0 – napięcie wyjściowe potencjometru.

Dla potencjometru liniowego:

$$U_0 = \frac{x}{l} U_z, \text{ przy czym } 0 \leq x \leq l$$



A zatem napięcie wyjściowe potencjometru jest proporcjonalne do wartości mierzonego przesunięcia lub kąta obrotu.

9.2.4. Przetworniki optoelektroniczne

W przeciwieństwie do potencjometrycznych lub indukcyjnych przetworniki optoelektroniczne dostarczają wyjście cyfrowych. Metoda pomiarowa polega na tym, że źródło światła (nadajnik) i część światłoczuła (odbiornik) przemieszczają się względem wzorca szklanego z siatką podziałową w postaci równo rozmieszczonych pól przejrzystych i nieprzejrzystych (kresiek). Liczba kresiek, nad którymi przemieści się głowica pomiarowa jest wymiarem odpowiadającym ruchowi testera lub głowicy bocznej. Wbudowana elektronika wytwarza z każdej przebytej kreski impuls wzmacniany i dostarczany do układu elektroniki, która zlicza te impulsy i przetwarza na informację o przebytej drodze. Występowanie dwóch ciągów sygnałów A i B przesuniętych w fazie pozwala na rewersyjne zliczanie impulsów. W niektórych modelach występuje również impuls referencyjny (znacznik zera), umieszczony w określonym miejscu skali. Znacznik ten (kanał C) pozwala na zerowanie układu pozycjonowania określając absolutną pozycję układu pomiarowe-

go. Metoda względna pomiaru ma wadę polegającą na tym, że możliwy jest pomiar odstepu pomiędzy dwoma punktami, zaletą jest natomiast duża rozdzielczość tej metody (do 1 μ m) pozwalająca na pomiary i pozycjonowanie o dużej dokładności. Oferowane są też liniowe przetworniki z listwą zębatą, gdzie źródłem informacji o położeniu jest przetwornik obrotowy z kołem zębatym toczonym po listwie zębatej.

Tabela 9.1. Przetworniki liniowe optoelektroniczne

Optoelektroniczne przetworniki liniowe ze szklanym wzorcem liniowym lub tarczą pomiarową		
TYPE	MS30	ME80/ME82
Zakres pomiarowy (mm)	30	100 ÷ 3700
Podziałka (μ m)	40	-
Rozdzielczość (μ m)	1/2/5/10	2-1000
Materiał obudowy	blacha stalowa	aluminium
Napięcie zasilania (V)	5	5 ÷ 28
Sygnal wyjściowy	TTL/LD	TTL/LD/OC
Maks prędkość przesuwu (m/s)	0,5	5
Temperatura pracy ($^{\circ}$ C)	od 0 do +45	od 0 do +70
Klasa ochrony	IP40	IP65
Podłączenie elektryczne	kabel	wtyczka

9.3. Przetworniki sił i naprężeń

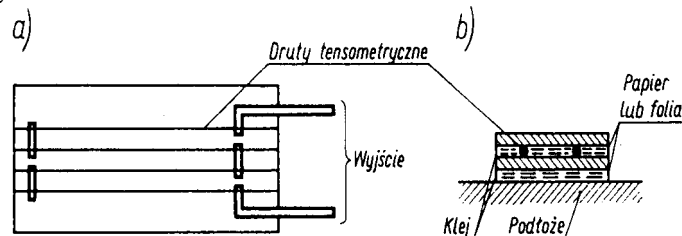
Wyposażenie chwytaka w przetworniki sił i naprężeń jest ważne z następujących powodów:

- umożliwiają one określenie bardzo ważnych interakcji między przedmiotem manipulowanym a chwytakiem. Jest to np. konieczne dla sterowania maksymalną dopuszczalną siłą chwytu na drodze nieliniowych sprzężeń zwrotnych niedopuszczających do uszkodzenia manipulowanego przedmiotu,
- umożliwiają określenie interakcji między manipulowanym przedmiotem a innymi elementami otoczenia względem, których przedmiot ten jest manipulowany. Jest to sytuacja charakterystyczna dla operacji montażu, przy których jedna część składowa produktu jest wsuwana w otwór innej części produktu. Znajomość naprężeń powstających przy takiej operacji w chwytaku manipulatora przyspiesza znacznie jej realizację, nawet przy małych luzach pasowania,

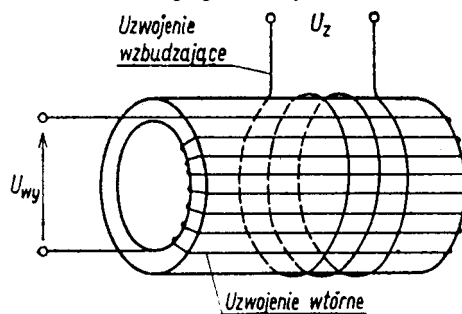
- przetworniki sił umożliwiają wyznaczenie niektórych współrzędnych charakteryzujących orientację przedmiotu, np. wyznaczenie kierunku normalnego do badanej powierzchni przedmiotu,
- w przypadku automatycznych manipulatorów sterowanych przez człowieka sprzężenie zwrotne od siły chwytu umożliwia człowiekowi bardziej precyzyjne manipulowanie.

Przetworniki sił były po przetwornikach położenia ramion drugimi w kolejności przetwornikami wprowadzanymi do robotów. Przyczyniła się do tego również łatwość adaptowania znanych przetworników sił i naprężeń do potrzeb powstałych w robotach. Należy tu wymienić:

- **przetworniki tensometryczno-rezystancyjne** wykorzystujące efekt zmiany rezystancji przewodnika metalowego poddanego naprężeniu mechanicznemu. Przetwornik ten składa się (rys.9.8) z drutów tensometrycznych wklejonych między dwie warstwy papieru lub folii. Przyklejenie przetwornika do powierzchni naprężanego elementu sprawia, że naprężenie to przenosi się na druty tensometryczne,
- **przetworniki magnetoelastyczne** wykorzystujące efekt zmiany kierunku wektorów magnetyzacji pod wpływem naprężeń oddziałujących na ferromagnetyk w formie walca w wyniku, czego zmienia się sprzężenie magnetyczne między uzwojeniami wtórnym a pierwotnym, nawiniętymi na walec (rys.9.9),
- przetworniki zamieniające siłę na przesunięcie mechaniczne, np. mieszaki sprężyste.

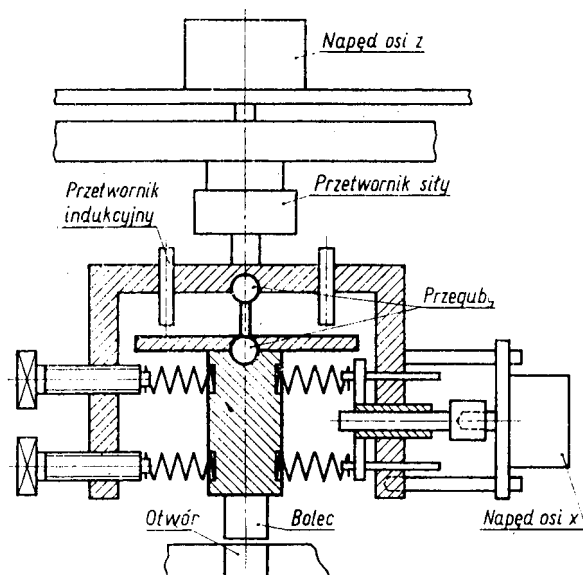


Rys.9.8. Przetwornik tensometryczno-rezystancyjny: a) widok z góry; b) przekrój poprzeczny



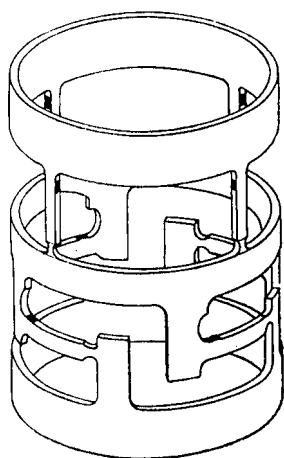
Rys.9.9. Przetwornik magnetoelastyczny

Na rys.9.10 przedstawiono rozwiązanie chwytaka do wkładania bolców w otwory mające tylko jeden przetwornik sił działających w osi z. Chwytnak ten ma



poza tym dwa przetworniki kąta ugięcia powierzchni pomocniczej, o którą opiera się bolec. Dane z tych przetworników są wykorzystywane do sterowania dwóch silników skokowych w osiach x i y, centrujących wkładany bolec.

Rys.9.10. Chwytnak do wkładania bolców z jednym przetwornikiem sił w osi z



Na rys.9.11 przedstawiono specjalnie ukształtowaną konstrukcję części łączącej kiść z ręką, zawierającą kilka przetworników tensometryczno-rezystancyjnych użytych do pomiaru trzech składowych sił i trzech składowych momentów.

Rys.9.11. Konstrukcja części łączącej kiść i ramię, zawierającej kilka przetworników tensometrycznych

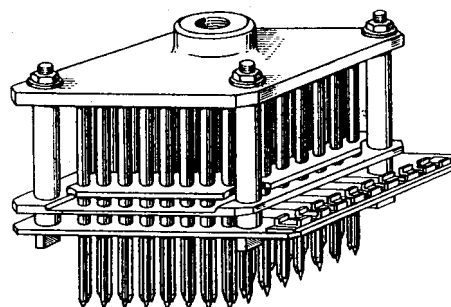
9.4. Przetworniki dotykowe

Przetwornikami dotykowymi nazywa się przetworniki generujące w wyniku dotknięcia przedmiotu macierz sygnałów elektrycznych, będącą odwzorowaniem powierzchni styku czynnej płaszczyzny przetwornika i dotykanego przedmiotu.

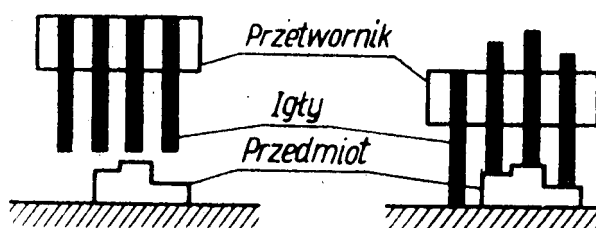
Przetworniki dotykowe generują, więc obraz przedstawiający kształt wymienionej powierzchni styku, przy czym obraz będzie tym dokładniejszy, im bardziej gęsta jest macierz sygnałów elektrycznych generowanych przez przetwornik. Obraz ten może być z powodzeniem wykorzystywany do precyzyjnego określenia po-

łożenia przedmiotu względem manipulatora, przy czym precyzja ta jest znacznie większa aniżeli precyzja możliwa do uzyskania przy stosowaniu przetworników optycznych. Te ostatnie przetworniki są z reguły wykorzystywane do przybliżonego określenia kształtu lub położenia przedmiotu. Przetworniki dotykowe znajdują zastosowanie przede wszystkim przy czynnościach montażowych charakteryzujących się tym, że montowane elementy są dostarczone na stanowisko montażu w sposób częściowo zorientowany.

Na rys.9.12 przedstawiono wygląd zewnętrzny elektromechanicznego przetwornika dotykowego, a na rys.9.13 – zasadę jego działania.

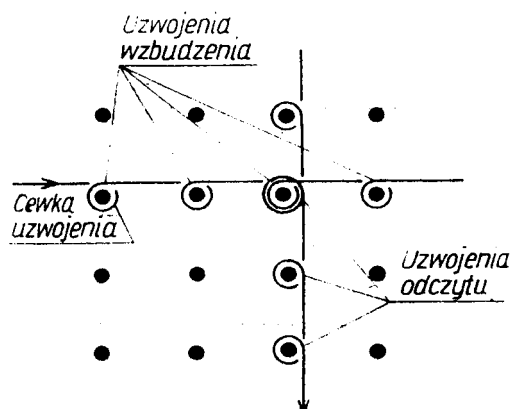


Rys.9.12. Wygląd zewnętrzny elektromechanicznego igłowego przetwornika dotykowego



Rys.9.13. Zasada działania przetwornika dotykowego

Przetwornik ten składa się z matrycy przesuwanych igieł, które pod wpływem siły ciężkości wysuwają się z przetwornika, a pod wpływem siły nacisku wywieranej przez dotykany przedmiot wsuwają się do przetwornika. Na rys.9.14 przedstawiono schemat układu do odczytu położenia igieł przetwornika.



Rys.9.14. Schemat układu do odczytu położenia igieł przetwornika

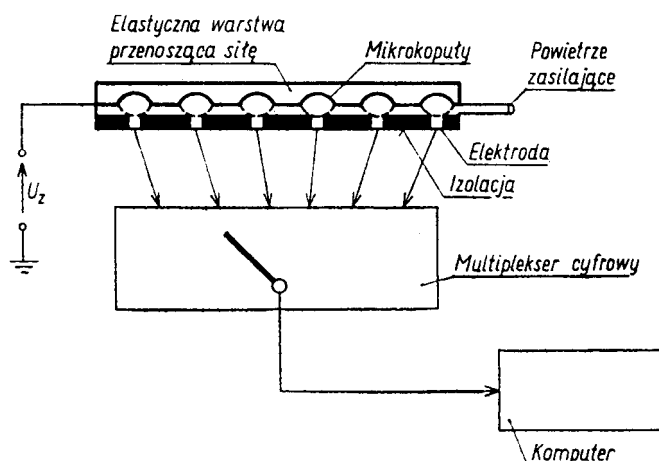
Każdej igle jest przyporządkowane uzwojenie wzbudzenia i uzwojenie odczytu. Uzwojenia te są nawinięte koncentrycznie tworząc cewkę, w którą może wsuwać się igła zmieniając tym samym współczynnik sprzężenia elektromagnetycznego między uzwojeniem wzbudzenia a uzwojeniem odczytu. Uzwojenia wzbudzenia tych samych wierszy matrycy igieł są połączone w szereg, tworząc linie wzbudzeń; również uzwojenia odczytu tych samych kolumn matrycy igieł są połączone w szereg, tworząc linie odczytu. Odczyt matrycy sygnałów elektrycznych generowanych przez przetworniki polega na kolejnym pomiarze i wprowadzeniu – po przetworzeniu analogowo-cyfrowym – do pamięci komputera sprzęgniętego z przetwornikiem sygnałów wszystkich linii odczytu w chwili pobudzania impulsem napięciowym kolejnej linii wzbudzenia. Zależnie od odległości, na jaką została wsunięta igła w cewkę, zmienia się wartość siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu odczytu przez impuls wprowadzony na odpowiadającą mu linię wzbudzenia.

Podstawową wadą przetwornika igłowego jest obecność ruchomych części zmniejszająca jego pewność ruchową.

Na rys.9.15 pokazano budowę przetwornika pneumatycznego. Podstawowym elementem to matryca mikrokopuł wykonana z cienkiej membrany metalowej. Mikrokopuły są sprężyste, przy czym każda z nich ma dwa stabilne położenia równowagi:

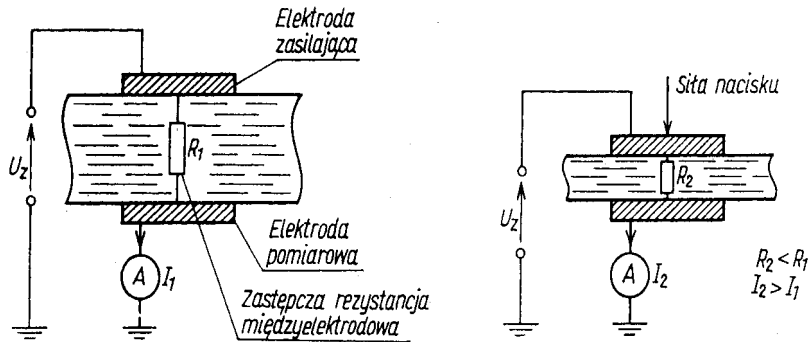
- położenie wypukłe (na zewnątrz), jeżeli nie działają na nią żadne siły zewnętrzne poza ciśnieniem powietrza zasilającego,
- położenie wklęsłe (do wnętrza), jeżeli nad mikrokopułą pojawi się odpowiednia siła nacisku.

Mikrokopuła w położeniu wklęsłym doprowadza napięcie zasilające do znajdującej się pod nią elektrody. Poszczególne elektrody są kolejno próbkowane z bardzo dużą prędkością przez multiplexer cyfrowy wprowadzający zakodowane binarne wartości ich napięć do pamięci współpracującego z przetwornikiem komputera.



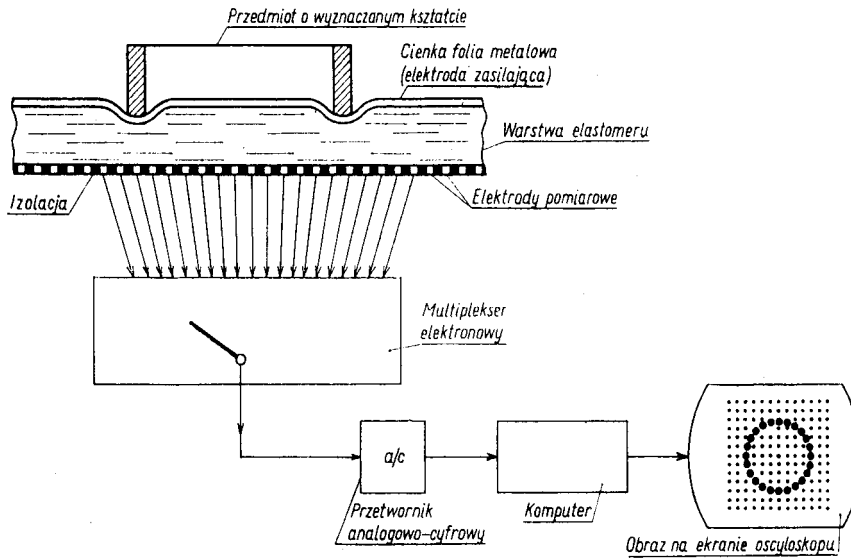
Rys.9.15. Budowa przetwornika pneumatycznego

Na rys.9.16 pokazano efekt elastomeryczno-rezystancyjny polegający na zmianie rezystancji przejścia między dwoma elektrodami przyłożonymi do elastomeru w zależności od zewnętrznej siły nacisku na elektrody. Zwiększenie siły nacisku powoduje zmniejszenie rezystancji przejścia i zwiększenie prądu płynącego przez elektrody.



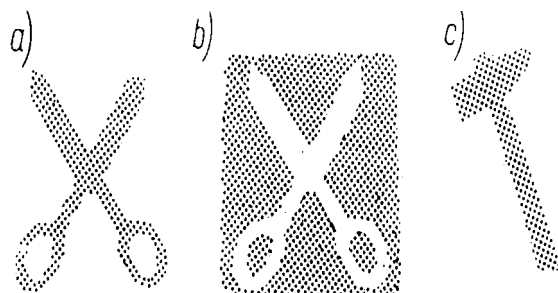
Rys.9.16. Efekt elastomeryczno-rezystancyjny

Na rys.9.17 przedstawiono budowę przetwornika elastomerycznego mającego u góry cienką sprężystą membranę metalową, stanowiącą elektrodę górną, a na spodzie – matrycę wzajemnie izolowanych elektrod próbkowanych, podobnie jak dla przetwornika pneumatycznego, przez multiplexer wprowadzający napięcie elektrod po przetworzeniu analogowo-cyfrowym do pamięci komputera.



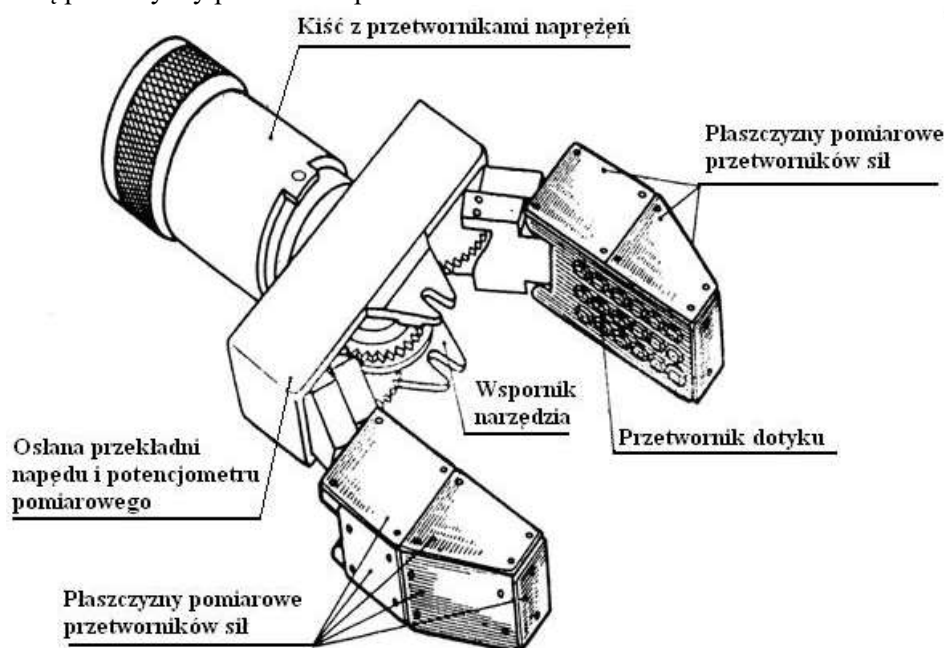
Rys.9.17. Budowa przetwornik elastomerycznego

Na rys.9.18 przedstawiono oscylogram napięć dla matrycy 24 x 24 w przypadku położenia na niej nożyczek i młotka.



Rys.9.18. Oscylogram napięć matrycy elastomerycznej 24 rzędy po 24 elektrody; a), b) nożyczki; c) młotek: a), c) kodowanie jakości proporcjonalnej do nacisku; b) kodowanie przeciwne.

Na rys.9.19 przedstawiono wygląd chwytaka, którego wewnętrzne powierzchnie palców zawierają przetwornik dotyku, a zewnętrzne powierzchnie palców stanowią płaszczyzny pomiarowe przetworników sił.



Rys.9.19. Widok chwytaka z palcami mającymi „sztuczną skórę” i przetworniki sił

Najczęściej obecnie spotykane przetworniki dotyku są wykonane w oparciu o przewodzące prąd elastomery. Elastomery te składają się z:

- warstwy sztucznego lub naturalnego kauczuku mającego pożądane właściwości mechaniczne (elastyczność, odporność na rozdarcie),
- zawieszonych w niej cząstek przewodzących prąd (grafit, węgiel aktywny, srebro, miedź lub cynk).

10. STEROWANIE ROBOTÓW

Roboty przemysłowe byłyby bezużyteczne, gdyby nie posiadały układu sterującego, do którego wprowadza się program. Stanowi on zapis algorytmu sterowania w określonym języku programowania.

Algorytm sterowania jest ciągiem operacji arytmetycznych i logicznych, określających przebiegi czasowe wielkości wejściowych sterujących obiektem sterowania w zależności od:

- celu sterowania,
- bieżącego czasu,
- współrzędnych stanu obiektu sterowania, w taki sposób, by osiągnąć cel sterowania.

Zadaniem układu sterowania jest:

- umożliwienie wprowadzenia programu pracy robota do jego pamięci,
- przechowanie programu pracy robota w pamięci,
- realizacja programu pracy robota na drodze odpowiedniego oddziaływania na napędy manipulatora,
- reagowanie na zdarzenia zachodzące w otoczeniu robota przez odpowiednią modyfikację programu pracy,
- umożliwienie ręcznego sterowania robota przez człowieka.

10.1. Podział układów sterowania

Przy rozpatrywaniu układu sterowania robota należy uwzględnić dwa różne aspekty tego układu:

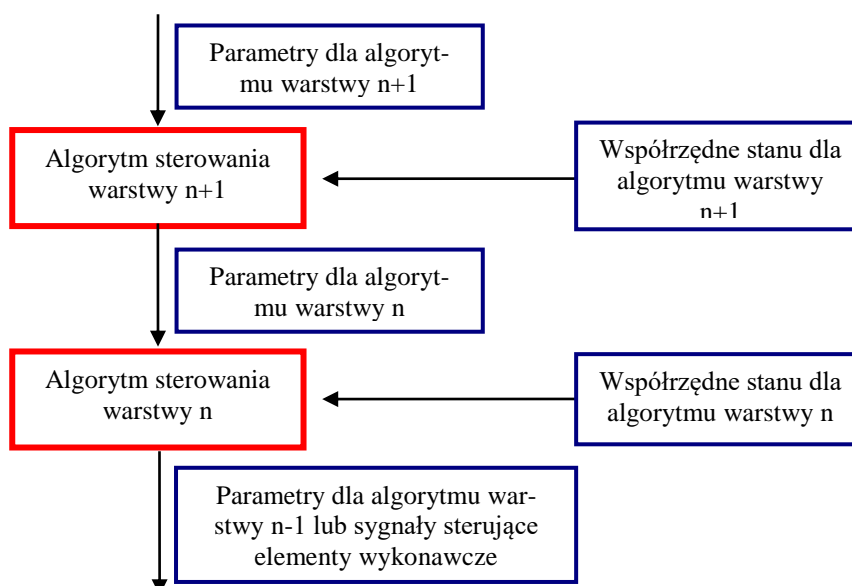
- układ sterowania robota realizuje określony zestaw algorytmów sterowania. Znajomość zestawu tych algorytmów oraz istniejących pomiędzy nimi powiązań ma istotne znaczenie dla zrozumienia mechanizmu funkcjonowania robota. Stąd wprowadza się pojęcie **struktury funkcjonalnej** układu sterowania robota,
- układ sterowania robota jest zrealizowany w oparciu o określone elementy sprzętu elektrycznego, elektronicznego lub pneumatycznego. Zestaw elementów sprzętu wchodzących w skład układu sterowania robota oraz powiązań istniejących między tymi elementami tworzy **strukturę sprzętową** układu sterowania robota.

Struktura funkcjonalna układu sterowania robota opisuje sposób przetwarzania informacji, którą robot dysponuje (program działania, dane o otoczeniu) na decyzje odnośnie pracy napędów jego manipulatorów. Charakteryzuje ona, więc układ sterowania z punktu widzenia operacji matematyczno-logicznych realizowanych na wymienionych informacjach w celu wytworzenia potrzebnych decyzji.

Struktura sprzętowa opisuje natomiast sprzęt za pomocą, którego są realizowane wymienione operacje matematyczno-logiczne.

10.2. Struktura funkcjonalna układu sterowania

Można powiedzieć, że najbardziej istotną cechą struktury funkcjonalnej układu sterowania robota jest jej hierarchiczność. Pojęcie hierarchiczności można zdefiniować już dla dwóch algorytmów podejmowania decyzji (algorytmów sterowania). Dwa algorytmy sterowania tworzą strukturę hierarchiczną prostą, przedstawioną na *rys.10.1*, jeżeli w wyniku realizacji jednego z nich, zwanego algorytmem warstwy wyższej, otrzymuje się parametry, niezbędne dla realizacji drugiego algorytmu, zwanego algorytmem warstwy niższej.



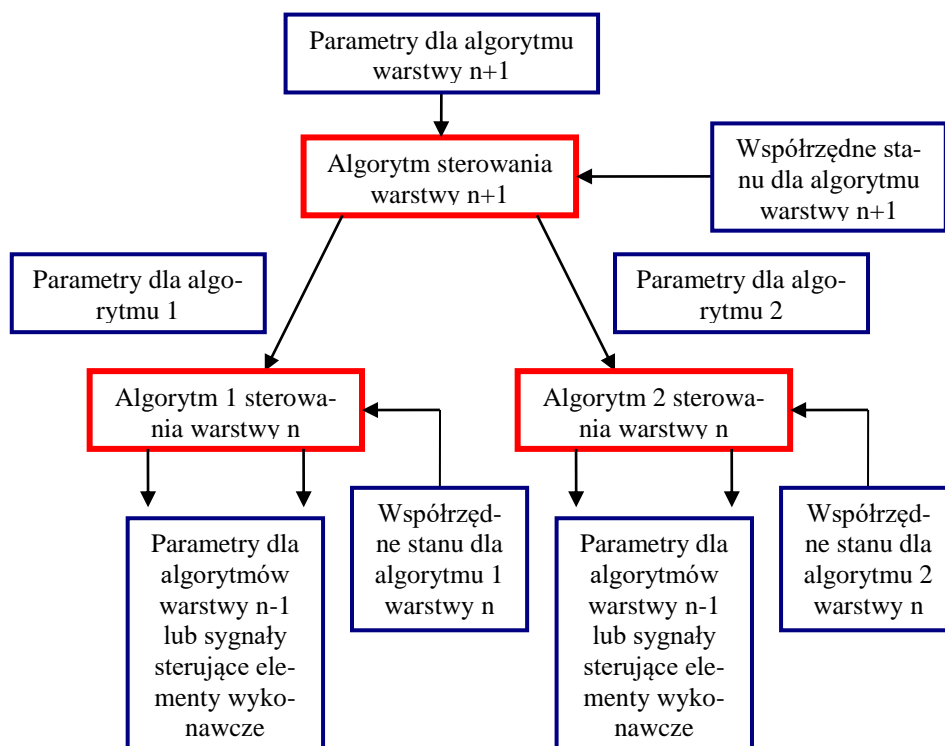
Rys.10.1. Schemat struktury hierarchicznej prostej

Istota jej polega na tym, że algorytm warstwy niższej może rozwiązać swój problem decyzyjny (problem sterowania) dopiero wówczas, gdy zostanie rozwiązany problem decyzyjny (problem sterowania) algorytmu warstwy wyższej, w wyniku, czego wyznaczone zostaną parametry niezbędne do rozwiązania problemu decyzyjnego algorytmu warstwy niższej.

W ogólnym przypadku struktury funkcjonalnej hierarchicznej jeden algorytm warstwy wyższej może wyznaczać parametry dla szeregu algorytmów warstwy niższej. Mówi się wówczas, że algorytm warstwy wyższej koordynuje algorytmy warstwy niższej, czyli przekazuje algorytmom warstwy niższej przez algorytm warstwy wyższej parametry niezbędne do zrealizowania zadania algorytmów warstwy niższej. Strukturę funkcjonalną z koordynowaniem algorytmów warstwy niższej, przedstawiono za pomocą schematu blokowego na *rys.10.2*, którą nazwano strukturą hierarchiczną piramidalną.

Oddziaływanie algorytmu warstwy wyższej na algorytmy warstwy niższej zmierza zawsze do osiągnięcia określonego celu, a więc jest samo w sobie sterowaniem. Obiektem sterowania dla algorytmu warstwy wyższej nie jest obiekt materialny (tzn. element sprzętu), lecz inne algorytmy.

Hierarchiczna struktura funkcjonalna układu sterowania robota wynika z dekompozycji zasadniczego zadania robota na szereg zadań składowych, czyli uchwycenia przedmiotu i jego przemieszczenia.



Rys.10.2. Schemat struktury hierarchicznej piramidalnej

Struktura hierarchiczna jest jedyną strukturą umożliwiającą rozwiązywanie bardzo złożonych problemów decyzyjnych, jakie spotyka się przy sterowaniu robota. Świadczy o tym:

- a) powszechność hierarchicznych struktur w systemach biologicznych. Przykładem może być system nerwowy człowieka, w którym najniższą warstwę sterowania tworzą sploty nerwowe, sterujące mięśniami i naczyniami krwionośnymi całego ciała. Sploty te są sterowane z warstwy wyższej, zawierającej ośrodki sterowania umieszczone w rdzeniu kręgowym i nadzorujące wykonywanie bardziej złożonych zespołów ruchów. Ośrodki te są z kolei sterowane przez nadrzędne ośrodki nerwowe w mózgu, wyznaczające cel i sposób realizacji ruchów w oparciu o informacje dostarczane przez zmysły oraz dane nagromadzone w pa-

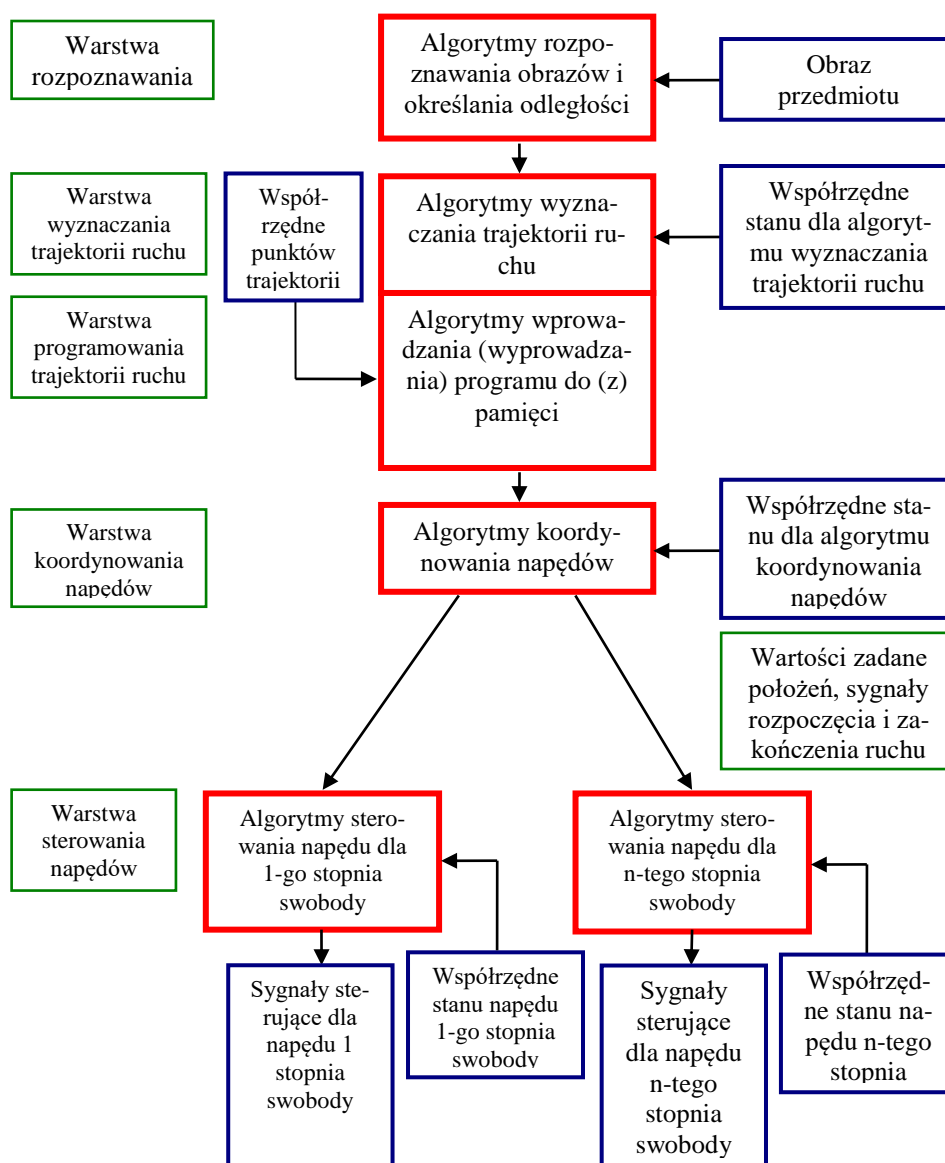
mięci. Struktura funkcjonalna układu sterowania robota jest, więc niesłychanie zgrubną, uproszczoną kopią struktury systemu nerwowego człowieka,

- b) powszechność hierarchicznie powiązanych algorytmów sterowania przy realizacji złożonych czynności motorycznych przez człowieka. Przykładem może być jazda na nartach lub prowadzenie samochodu, gdzie:
- w warstwie najniższej realizowane jest sterowanie czynnościami motorycznymi, jak np. włączanie biegów, manipulowanie sprzęgłem, hamulcem i kierownicą, albo ześlizg boczny, uginanie nóg, przenoszenie ciężaru ciała z narty na nartę. Sterowanie to jest u doświadczonych kierowcy lub wprawnego narciarza całkowicie zautomatyzowane, tzn. odbywa się bez udziału świadomości,
 - w warstwie wyższej powstają decyzje odnośnie kierunku i szybkości jazdy w zależności od przeszkód znajdujących się na drodze, konfiguracji drogi, warunków terenowych. Decyzje te są z kolei przekazywane do warstwy niższej,
 - w warstwie najwyższej powstają decyzje odnośnie celu jazdy (np. dojechać do określonego miejsca w określonym czasie, przejechać trasę zjazdu bez upadku w najkrótszym czasie),
- c) powszechność hierarchicznych struktur sterowania w dużych, złożonych organizacjach społecznych, administracyjnych, gospodarczych i militarnych, tworzonych na przestrzeni dziejów przez człowieka. Organizacje te składają się zawsze z szeregu hierarchicznie powiązanych jednostek decyzyjnych, przy czym jednostki decyzyjne warstw niższych wypracowują swoje decyzje na podstawie wytycznych otrzymanych z warstw wyższych w wyniku rozwiązania problemów decyzyjnych tych warstw.

10.2.1. Warstwy układu sterowania

We wszystkich istniejących robotach można wyróżnić następujące warstwy struktury funkcjonalnej układu sterowania przedstawiona na *rys.10.3*:

- a) warstwę sterowania napędów, będącą warstwą najniższą. Elementami tej warstwy są algorytmy sterowania napędów poszczególnych stopni swobody manipulatora. Do warstwy tej przekazywane są z warstwy wyższej następujące parametry:
- sygnały określające momenty rozpoczęcia ruchów poszczególnych napędów,
 - wartości zadane położeń końcowych ramion manipulatora w przypadku, gdy sterowanie połozeniami ramion jest realizowane ze sprzężeniami zwrotnymi,
 - przebiegi czasowe wartości zadanych położeń ramion manipulatora dla przypadku układów sterowania połozenia ramion ze sprzężeniami zwrotnymi lub układów sterowania połozenia ramion w torze otwartym z silnikami skokowymi,



Rys.10.3. Struktura funkcjonalna układu sterowania robota

b) warstwę koordynowania napędów, będącą warstwą wyższą (nadrzędną) dla warstwy sterowania napędów. Zależnie od generacji i klasy robota warstwa ta może:

- sterować sekwencyjnie układami sterowania napędów z warstwy sterowania napędów na drodze wyznaczania momentów uruchomienia napędów w zależności od programu pracy robota, zdarzeń zachodzących w manipulatorze

- (np. ukończenie poprzedniego ruchu) lub zdarzeń zachodzących w obsługiwanej maszynie (np. obecność przedmiotu wymagającego manipulowania),
- sterować w torze otwartym serwomechanizmami warstwy sterowania napędów na drodze wyznaczania przebiegów czasowych wartości zadanych tych serwomechanizmów w zależności od programu pracy robota, zdarzeń zachodzących w manipulatorze i obsługiwanej maszynie oraz parametrów otrzymanych z warstwy wyższej,
 - sterować w torze otwartym silnikami skokowymi poszczególnych ramion manipulatora na drodze wyznaczania ciągu impulsów sterujących dla tych silników,
- c) warstwa programowania trajektorii ruchu jest potrzebna w celu umożliwienia uczenia robota. Uczeniem robota nazywa się wprowadzanie wartości współrzędnych naturalnych ramion manipulatora odpowiadających kolejnym punktom trajektorii ruchu, wzdłuż której ramiona te powinny się przemieszczać do pamięci układu sterowania robota w trakcie wodzenia ramion manipulatora przez człowieka wzdłuż wymienionej trajektorii,
- d) warstwa wyznaczania trajektorii ruchu ma za zadanie na podstawie informacji wizualnej o położeniu przedmiotu i jego kształcie określić takie przebiegi czasowe współrzędnych naturalnych w wyniku, których manipulator lub jego wybrany punkt (np. chwytak) przemieści się po zadanej trajektorii w przestrzeni trójwymiarowej lub przesunie się do zadanego punktu końcowego w tej przestrzeni. Aby otrzymać jednoznaczne rozwiązanie dla wymienionych przebiegów czasowych, żąda się zazwyczaj spełnienia dodatkowych warunków, np. wykonania ruchu przy minimalnym zużyciu energii lub w minimalnym czasie,
- e) warstwa rozpoznania przedmiotu, której zadaniem jest przeprowadzenie klasyfikacji przedmiotów oraz określenie współrzędnych punktów, do których należy doprowadzić chwytak w celu chwycenia przedmiotu lub wykonania potrzebnych manipulacji.

10.3. Warstwy sterowania napędów

Celem działania warstwy sterowania napędów jest:

- uruchomienie siłowników lub silników wykonawczych poszczególnych stopni swobody w chwilach wyznaczonych przez warstwę koordynowania napędów,
- przesunięcie lub obrót napędzanego ramienia o wielkość zadaną przez warstwę koordynowania napędów,
- zatrzymanie, wyłączenie, ewentualnie zahamowanie napędu po dojściu do zadanej pozycji końcowej.

W warstwie sterowania napędów znajduje się tyle układów sterowania napędów, ile robot posiada stopni swobody. Układami tymi mogą być:

- układy sterowania w torze otwartym, z zatrzymywaniem ramienia za pomocą ograniczników zderzakowych. Układy takie są powszechnie stosowane w

przypadku napędów pneumatycznych oraz hydraulicznych. Dla układów tych warstwa koordynowania napędów wyznacza tylko momenty rozpoczęcia ruchów i kolejność ruchów, przy czym z reguły w każdej chwili pracuje tylko jeden napęd. Stąd trajektoria ruchu chwytaka tych robotów ma charakterystyczne nieciągłości (rozruch, zatrzymanie, ostra zmiana kierunku ruchu),

- układy sterowania w torze otwartym, z zatrzymywaniem ramienia za pomocą wyłączników drogowych sterujących napędy i ewentualnie hamulce ramion. Dla układów takich warstwa koordynowania napędów wyznacza również tylko chwile rozpoczęcia ruchów i kolejność ruchów. Układy takie spotyka się dla napędów hydraulicznych, a przy wyposażeniu w hamulce również dla napędów pneumatycznych,
- układy sterowania w torze otwartym z silnikami skokowymi. Dla napędów tych warstwa koordynowania napędów wyznacza chwile rozpoczęcia ruchu oraz przebiegi czasowe wartości zadanych przełożeń. Układy te z kolei generują, ciągi impulsów powodujące wymagane obroty silników skokowych i zmianę położeń ramion,
- układy sterowania położenia ramion ze sprzężeniami zwrotnymi (serwomechanizmy). Dla układów tych warstwa koordynowania napędów może, oprócz wyznaczania momentów rozpoczęcia ruchów i kolejności ruchów, przekazać również wartości zadane położeń końcowych, a w niektórych przypadkach również przebiegi czasowe wartości zadanych. Istnieje przy tym możliwość równoczesnej pracy wielu napędów, co umożliwi realizację ruchów po skomplikowanych, lecz gładkich trajektoriach, potrzebnych np. przy zastosowaniu robotów do lakierowania lub spawania łukowego.

10.4. Warstwa koordynowania napędów

Zadaniem warstwy koordynowania napędów jest tworzenie sygnałów sterujących dla podporządkowanej warstwy sterowania napędów w taki sposób, by zrealizować cel działania robota, tj. przemieścić ramiona manipulatora po określonej trajektorii z zadanego położenia początkowego w zadane położenie końcowe. W warstwie koordynowania napędów stosuje się:

- a) sterowanie logiczne sekwencyjne jest powszechnie stosowane dla najprostszych robotów, o napędach pneumatycznych i hydraulicznych ze sterowaniem w torze otwartym i ogranicznikami zderzakowymi lub wyłącznikami drogowymi. Zadaniem warstwy koordynowania napędów jest wówczas wyłącznie wyznaczenie sekwencji sygnałów sterujących dla tych napędów w zależności od:
- programu pracy robota,
 - stanu ograniczników zderzakowych lub wyłączników drogowych,
 - czasu, który upłynął od określonego zdarzenia,
 - stanu manipulowanego przedmiotu lub obsługiwanej maszyny.

Sekwencja sygnałów sterujących powoduje kolejne uruchomienie napędów i kolejne wykonywanie zaprogramowanych ruchów elementarnych, składających się na ruch wypadkowy manipulatora. Przy tego rodzaju sterowaniu z reguły w danej chwili czasu ruch wykonuje tylko jedno ramię. Stąd trajektoria ruchu chwytaka manipulatora ma charakterystyczne nieciągłości w punktach będących końcem jednego ruchu i początkiem następnego ruchu.

- b) sterowanie ciągłe w torze otwartym jest stosowane wyłącznie w najbardziej złożonych robotach, mających w warstwie sterowania napędów serwomechanizmy położenia lub silniki skokowe. Zadaniem warstwy koordynowania napędów jest wówczas wyznaczanie przebiegów czasowych wartości zadanych położeń i ich przekazywanie do warstwy podporządkowanej, na bieżąco w czasie i równoległe dla poszczególnych napędów. Sprawia to, że trajektorie ruchu ramion są ciągłe i gładkie.

10.5. Warstwa programowania trajektorii ruchu

Zadaniem warstwy programowania trajektorii ruchu jest umożliwienie uczenia robota, czyli:

- przeprowadzenie pomiaru wartości współrzędnych naturalnych odpowiadających kolejnym punktom zadanej trajektorii ruchu ramion,
- przechowanie tych wartości w pamięci układu sterowania robota.

Dokonywane jest to w trakcie wodzenia przez człowieka ramionami manipulatora wzdłuż zadanej trajektorii. Uczenie robota jest jednym z najprostszych i najbardziej rozpowszechnionych sposobów wyznaczania przebiegów czasowych współrzędnych naturalnych, potrzebnych warstwie koordynowania napędów. Do zalet uczenia należy:

- możliwość bardzo szybkiego zaprogramowania skomplikowanych trajektorii ruchu w bardzo naturalny sposób, tzn. na drodze wykreślenia tej trajektorii w przestrzeni trójwymiarowej, w której będzie ona realizowana przez manipulator. W przypadku robotów do lakierowania i spawania zaprogramowanie potrzebnych trajektorii może przeprowadzić wykwalifikowany lakiernik lub spawacz,
- możliwość szybkiego modyfikowania zaprogramowanej trajektorii,
- możliwość efektywnego stosowania uczenia przez niskokwalifikowany personel,
- duża prostota układów cyfrowych lub programów komputerowych, potrzebnych do uczenia.

Wadą uczenia jest przede wszystkim jego ograniczona przydatność w przypadku uzależnienia trajektorii ruchu manipulatora od informacji dostarczanych przez optyczne przetworniki obrazu i odległościomierze.

10.5.1. Rodzaje uczenia

Rozróżnia się:

- a) uczenie ciągłe, które polega na automatycznym wprowadzaniu do pamięci układu sterowania, z odpowiednio dużą częstotliwością, wartości współrzędnych naturalnych kolejnych punktów trajektorii ruchu ramion, wodzonych przez człowieka wzdłuż zadanej trajektorii. Istotą uczenia ciągłego jest to, że:
- wybór punktów trajektorii przechowywanych w pamięci nie zależy od uczącego człowieka, który może wyłącznie ustalić częstotliwość próbkowania przetworników położenia ramion i zainicjować zbieranie danych,
 - kolejno zapamiętywane punkty trajektorii są równoodległe w czasie, czyli kolejno zapamiętywane punkty trajektorii mogą różnić się wartościami wszystkich współrzędnych naturalnych,
 - uczenie odbywa się z reguły w tej samej skali czasu, w jakiej później trajektoria zostaje odtworzona. Przyspieszenie ruchów robota wymaga, więc przyspieszenia ruchów podczas uczenia.
- b) uczenie dyskretne polega na wprowadzaniu na rozkaz człowieka do pamięci układu sterowania współrzędnych naturalnych kolejnych punktów trajektorii ruchu ramion, do których to punktów ramiona zostały doprowadzone na drodze sterowania ręcznego przez człowieka i w punktach tych na okres uczenia unieruchomione. Istotą uczenia dyskretnego jest to, że:
- wybór punktów trajektorii przechowanych w pamięci zależy całkowicie od uczącego człowieka. Liczba tych punktów jest znacznie mniejsza aniżeli przy uczeniu ciągłym. Punkty te powinny być tak wybrane, by trajektoria powstała przez interpolację między tymi punktami była dostatecznie bliska trajektorii pożądaney,
 - kolejno zapamiętywane punkty trajektorii nie są równoodległe w czasie,
 - kolejno zapamiętywane punkty trajektorii nie zawsze mogą różnić się wartościami wszystkich współrzędnych naturalnych. Jeżeli liczba stopni swobody manipulatora będzie większa od liczby niezależnych parametrów trajektorii, to znajomość punktu początkowego i końcowego trajektorii nie umożliwia jednoznacznego określenia sposobu przejścia manipulatora z punktu początkowego do punktu końcowego,
 - czas odtwarzania trajektorii jest niezależny od czasu, w jakim dokonano uczenia.

10.6. Warstwa wyznaczania trajektorii ruchu

Trajektorie ruchu ramion manipulatora dla kolejnych manipulacji mogą się wyraźnie różnić, co wynika np. ze zmian położenia początkowych manipulowanych przedmiotów lub zmian orientacji tych przedmiotów. W takiej sytuacji sztywny program manipulacji, wprowadzony do pamięci robota podczas uczenia, okazałby się bezużyteczny. Stąd konieczność zastąpienia warstwy programowania trajektorii

ruchu warstwą wyznaczania trajektorii ruchu współrzędnych naturalnych, zwanej krótko warstwą wyznaczania trajektorii ruchu.

Zadaniem tej warstwy jest określenie takich dopuszczalnych przebiegów czasowych współrzędnych naturalnych manipulatora, które zapewniają przemieszczenie chwytaka do wybranego punktu trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej, w której znajduje się robot. Przemieszczenie to może być realizowane:

- z zachowaniem zadanej trajektorii chwytaka w przestrzeni trójwymiarowej,
- przy dowolnej dopuszczalnej trajektorii chwytaka kończącej się w wybranym punkcie.

Współrzędne chwytaka w wymienionej trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej będą się w dalszym ciągu nazywać współrzędnymi naturalnymi chwytaka.

Dopuszczalnymi przebiegami czasowymi współrzędnych naturalnych manipulatora nazywa się takie przebiegi czasowe, przy których:

- nie nastąpi przekroczenie granicznych położeń ramion,
- nie dojdzie do kolizji ramion manipulatora z przedmiotami go otaczającymi.

Dopuszczalną trajektorią chwytaka nazywa się trajektorię, która nie przecina przedmiotów z otoczenia manipulatora.

10.7 Warstwa rozpoznawania przedmiotów

Zasadniczym zadaniem warstwy rozpoznania przedmiotu jest dostarczenie wszystkich informacji dotyczących przedmiotu, potrzebnych w warstwie niższej do wyznaczenia trajektorii ruchu manipulatora oraz do wyboru programu manipulowania tego przedmiotu. Warstwa ta powinna:

- wykryć obecność przedmiotu wymagającego manipulacji,
- sklasyfikować przedmiot, tzn. określić jego tożsamość,
- określić jego współrzędne aktualne i przyszłe (np. w przypadku przedmiotu przesuwanego się).

Zadanie to jest realizowane na drodze:

- zbierania danych charakteryzujących kształt przedmiotów obserwowanych przez przetwornik obrazu. Dane te będą, w dalszym ciągu nazywane obrazami,
- ekstrakcji cech, tzn. matematycznego przetwarzania obrazów w celu określenia niektórych ich cech charakterystycznych, niezależnych od orientacji i położenia obrazu,
- klasyfikacji obrazów na podstawie ich cech z cechami zadanych obrazów wzorcowych,
- ekstrakcji orientacji i określenia współrzędnych charakterystycznych punktów obrazu,
- uczenia cech i orientacji, polegającej na wprowadzeniu do pamięci operacyjnej komputera cech i orientacji obrazów otrzymanych w wyniku wprowadzenia w pole widzenia przetwornika obrazu.

11. BADANIA ROBOTÓW

11.1. Rodzaje i przeznaczenie badań robotów

Właściwości statyczne i dynamiczne maszyn manipulacyjnych można wyznaczyć w wyniku badań symulacyjnych lub prób funkcjonalnych. Badania symulacyjne w technice zrobotyzowanej ograniczają się do projektowania maszyn manipulacyjnych oraz do komputerowo wspomaganego projektowania zastosowań maszyn manipulacyjnych.

Spośród tych dwóch rodzajów badań większe znaczenie w technice mają badania funkcjonalne. Próby funkcjonalne prowadzone są w celu:

- zweryfikowania przyjętej koncepcji maszyny manipulacyjnej na etapie budowy modelu i prototypu,
- dopuszczenia prototypu do produkcji,
- dopuszczenie maszyny manipulacyjnej do procesu ruchu w określonych przepisami i normami warunkach procesu produkcyjnego,
- odbioru maszyny manipulacyjnej przez użytkownika,
- kontroli poprawności działania w trakcie przeglądów i po naprawach.

11.2. Badania symulacyjne

Celem symulacji jest opracowanie modelu matematycznego maszyny manipulacyjnej w postaci równań ruchu jednostki kinematycznej lub równań stanu z uwzględnieniem wektora algorytmu sterowania.

Badania symulacyjne na etapie projektu polegają na testowaniu programu symulacyjnego przy różnych parametrach konstrukcyjnych, strukturalnych i energetycznych danej jednostki kinematycznej. Pozwala to na łatwą optymalizację właściwości dynamicznych zespołu ruchu i całej jednostki kinematycznej oraz umożliwia poszukiwanie najbardziej efektywnego sterowania.

Na etapie projektowania zastosowań program symulacyjny zawierający sztywny model matematyczny konkretnej maszyny testowany jest przez zadawanie współrzędnych punktów podporowych lub równań toru ruchu w przestrzeni roboczej, parametrów ruchu oraz parametrów transportowanego obiektu.

Wynikiem testowania jest określenie rzeczywistego przebiegu toru ruchu obiektu manipulacji w funkcji czasu i współrzędnych układu maszyny. W rezultacie na etapie projektowania stanowiska zrobotyzowanego możliwe jest określenie punktów i obszarów kolizyjnych, czasu cyklu produkcyjnego, błędów pozycjonowania, itp. Pozwala to na optymalizację algorytmu zadania zleconego maszynie do realizacji oraz właściwe ustawienie jednostki kinematycznej w stosunku do innych maszyn i urządzeń.

Równanie ruchu jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej wyznacza się jedną z dwóch metod:

- metoda ciała sztywnego z silnymi więzami,

- metoda współrzędnych uogólnionych (równanie Lagrange'a).

W pierwszej metodzie, rozpatrując każdy człon łańcucha kinematycznego tworzącego jednostkę kinematyczną maszyny manipulacyjnej jako sztywne ciało swobodne, przyjmuje się, że moment lub siła przyłożona do członu są zmieniane przez układ sterowania. Przy istniejących połączeniach między członami ruch członu wywołuje reakcję w postaci pozostałych momentów i sił. Reakcje te są określone przez opisanie położenia członu oraz dwukrotne zróżniczkowanie w celu otrzymania wystarczającej liczby równań. Równania te są następnie rozwiązywane przez całkowanie po współrzędnych uogólnionych.

W drugiej metodzie wyznacza się funkcję potencjału kinematycznego Lagrange'a jako różnicę między energią kinetyczną i potencjalną,

$$L = E - V$$

z której po zróżniczkowaniu po współrzędnej uogólnionej odpowiednich członów, tworzy się równanie Lagrange'a.

$$\left[\frac{d}{dt} \right] \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_j} \right) = Q_j \quad j = 1..n$$

Metoda Lagrange'a jest najbardziej skuteczna dla niewielkiej liczby członów o jednym stopniu swobody.

11.3. Próby funkcjonalne

Pełny program obejmuje badania kinematyczne, dynamiczne i eksploatacyjne.

W badaniach kinematycznych wyróżnia się pomiary:

- a) parametrów geometrycznych dotyczących:
 - przestrzeni ruchu jednostek kinematycznych,
 - błędu pozycjonowania,
 - dokładności odtwarzania zaprogramowanego toru ruchu,
 - minimalnego przemieszczenia poszczególnego zespołu ruchu i całej jednostki kinematycznej,
 - przemieszczeń po sygnale awaryjnym STOP,
 - dokładności synchronizacji ruchu jednostki kinematycznej względem zadanego ruchu innego urządzenia,
- b) parametrów ruchu poszczególnych zespołów i całej jednostki kinematycznej, w tym:
 - czasu przemieszczenia,
 - prędkości,
 - przyśpieszenia ruchu,

Badania dynamiczne obejmują pomiary:

- a) wartości sił:
 - uchwycenia przez chwytaki,
 - wytworzonych przez układy napędowe poszczególnych zespołów ruchu,
 - obciążających operatora podczas programowania maszyny manipulacyjnej przez obwiedzenie toru ruchu,
 - obciążeń zewnętrznych,
- b) podatności jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej na drgania, w tym:
 - wartości siły wzbudzającej drgania o określonej amplitudzie,
 - zmian wartości amplitudy i liczby okresów drgań po usunięciu wymuszenia siłowego,

W badaniach eksploatacyjnych mierzy się:

- a) parametry energetyczne, w tym:
 - pobór energii przez pracujące w określony sposób układy zasilania, ruchu i sterowania,
 - wpływ zmian warunków zasilania na pracę maszyny manipulacyjnej, szczególnie układu sterowania i jednostki kinematycznej.
- b) wpływ zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych na pracę układu sterowania,
- c) poziom emisji hałasu wytwarzanego przez pracujące układy maszyny manipulacyjnej,
- d) poziom emisji ciepła,

11.4. Badania kinematyczne

11.4.1. Pomiary parametrów geometrycznych

Pomiarów parametrów geometrycznych dokonuje się po wykonaniu przez maszynę manipulacyjną określonego cyklu ruchów, przy różnych warunkach obciążenia i prędkości przemieszczeń. Położenie w przestrzeni określonego punktu można określić dwoma sposobami:

- za pomocą pomiarów opartych na wartościach wygenerowanych przez własne układy pomiarowe maszyny,
- za pomocą pomiarów dokonanych sprzętem pomiarowym niezwiązanym z maszyną.

Pierwsza metoda pomiarowa jest mało dokładna, gdyż następuje sumowanie błędów pomiarów położenia poszczególnych zespołów łańcucha kinematycznego maszyny oraz nie są uwzględniane odkształcenia elementów mechanicznych.

Jedną z metod pomiarów parametrów geometrycznych jest uniwersalne stanowisko badawcze maszyn manipulacyjnych, na którym możliwe jest dokonywanie bezpośrednich pomiarów w przestrzeni trójwymiarowej. Urządzenie pomiarowe składa się z głowicy wyposażonej w bezkontaktowe czujniki indukcyjne współpracującej

z próbnikiem umieszczonym w badanym miejscu jednostki kinematycznej. Zakres pomiarowy wynosi $\pm 12.5\text{mm}$, a błąd pomiaru 0.1mm . Układ ten pozwala zmierzyć:

- współrzędne prostokątne mierzonego punktu (względem układu osi stanowiącego pomiarowego),
- błędy (bezwzględne i względne) współrzędnych punktu,
- przyrosty współrzędnych punktu w funkcji obciążenia, prędkości przemieszczeń, czasu pracy, itp.,
- odległość punktu następnego od poprzedniego,
- błędy (bezwzględne i względne) między punktami,
- błąd bezwzględny przy odtwarzaniu toru ruchu zaprogramowanego przy pomocy wzorca.

Inne metody pomiaru błędu pozycjonowania i odtwarzania toru ruchu:

- optyczna – wykorzystująca dwa teodolity, szczególnie przydatna do pomiaru błędu statycznego i pozycjonowania o dokładności pomiaru o rząd wyższej niż w metodzie opisywanej powyżej,
- filmowa – wykorzystująca dwie rozstawione prostopadle względem siebie kamery.

Geometria przestrzeni ruchu jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej określona jest przez pomiar przemieszczeń liniowych i kątowych w osiach ruchu regionalnego. Celem pomiarów jest sprawdzenie danych katalogowych producenta, szczególnie określenie różnic między mechanicznymi i sterowniczymi przestrzennymi roboczymi i kolizyjnymi jednostki kinematycznej.

Błąd pozycjonowania wyznacza się dla różnych warunków pracy maszyny manipulacyjnej po wykonaniu określonego cyklu przemieszczeń, przy różnych obciążeniach, zakresach przemieszczeń i prędkościach. Wstęgę rozrzutu błędów pozycjonowania wyznacza się dla kilku punktów kontrolnych i przy obustronnych najazdach.

Pomiarów błędów pozycjonowania należy dokonywać po osiągnięciu stabilności cieplnej maszyny manipulacyjnej, gdyż w fazie początkowej wartości błędów zależą od temperatury zespołów ruchu jednostki kinematycznej. Jest to szczególnie ważne dla maszyn z napędem hydraulicznym, gdzie taka stabilizacja osiągana jest dopiero po kilku godzinach pracy.

Pomiarów dokładności odtwarzania dokonuje się przez:

- zaprogramowanie toru przy wykorzystaniu wzorca umieszczonego w przestrzeni roboczej, wzdłuż którego prowadzona jest głowica pomiarowa ślizgająca się po nakładkach dystansowych, po liniale,
- rejestrowanie odchylen mierzonych przez czujniki głowicy pomiarowej pozabawionej nakładek dystansowych względem liniału, z reguły w dwóch osiach, w trakcie pracy w cyklu automatycznym.

Pomiary, podobnie jak w przypadku badania błędu pozycjonowania, powinny być wykonywane po osiągnięciu przez maszynę manipulacyjną stabilności cieplnej.

Minimalne dające się zaprogramować przemieszczenie, będące kolejnym badanym parametrem, jest związane z właściwościami układu sterowania, układu pomiarowego i układów napędowych jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej. Przy małych przemieszczeniach można się spodziewać gwałtownego wzrostu błędu pozycjonowania. Przemieszczenie po sygnale STOP – AWARIA jest określane ze względu na bezpieczeństwo. Z reguły po naciśnięciu STOP mierzy się czas upływający do zatrzymania jednostki kinematycznej oraz przemieszczenia poszczególnych zespołów ruchu jednostki kinematycznej.

Pomiary dokładności synchronizacji ruchu jednostki kinematycznej maszyny manipulacyjnej i współpracujących z nią urządzeń są ważne w przypadku ruchomego obiektu manipulacji lub w przypadku wykonywania operacji technologicznych na ruchomym obiekcie. Pomiaru dokładności synchronizacji dokonuje się mierząc w układzie trójwymiarowym między próbnikiem a obiektem w wybranych punktach zakresu wspólnego ruchu.

11.4.2. Pomiary parametrów ruchu

Pomiary czasów przemieszczenia przeprowadza się w celu określenia czasu trwania cyklu pracy maszyny manipulacyjnej. Czas trwania cyklu t_T jest sumą:

$$t_T = \sum (t_{sn} + t_m + t_{vkn} + t_{hn} + t_{dn} + t_{gn})$$

gdzie:

- t_s – czas włączania (opóźnienia reakcji maszyny na sygnał sterujący),
- t_r – czas rozpędzania,
- t_{vk} – czas stałej prędkości ruchu,
- t_h – czas hamowania,
- t_d – czas wygaśnięcia drgań,
- t_g – czas roboczy np. czas chwytania,
- n – numer kroku w danym cyklu.

Badania czasu trwania cyklu mają charakter porównawczy i prowadzone są w tzw. cyklu próbnym przy ściśle określonych wartościach przemieszczeń i czasach roboczych.

Program badań prędkości i przyspieszeń powinien objąć pomiary składowych przestrzennych:

- przebiegu prędkości w funkcji przemieszczenia,
- maksymalnej wartości prędkości,
- średniej prędkości,
- przebiegu przyspieszeń w funkcji przemieszczenia,
- maksymalnej wartości przyspieszenia.

Pomiary prędkości i przyspieszeń wykonywane są często podczas pomiarów parametrów geometrycznych. Wykonywane są metodą pośrednią, przez pomiar przemieszczeń (lub prędkości) w funkcji czasu (lub drogi), które po zróżniczkowaniu

dają prędkość (lub przyśpieszenie). Pomiary średniej prędkości ruchu dokonywane są przez pomiar przemieszczenia i czasu jego realizacji.

Szczególne znaczenie mają pomiary przyśpieszeń, zwłaszcza wartości maksymalnych. Pozwalają one na wyznaczenie sił działających na obiekt manipulacji w chwytaku lub narzędzie w trakcie jego ruchu, a tym samym określić siły uchwycenia lub oddziaływania narzędzia na obiekt manipulacji.

11.5. Badania dynamiczne

Do pomiaru sił wykorzystywane są czujniki:

- tensometryczne w układzie pojedynczym, płaskim i przestrzennym,
- indukcyjne sprzężone ze sprężystym, wymiennym elementem pomiarowym.

Pomiary sił wywieranych przez jednostkę kinematyczną są ważne w przypadku wykonywania przez maszynę manipulacyjną zada technologicznych. Wartości sił użytecznych, odbieranych z układu maszyny, mogą być dopuszczalnym w praktyce przybliżeniem określonym pośrednio, analitycznie, na podstawie obliczonej wartości zastępczej masy ruchomej i zmierzonych wartości przyśpieszeń.

Zbyt duże wartości sił programowania prowadzą do dwóch niekorzystnych zjawisk:

- gorszej jakości zaprogramowanego toru ruchu, a tym samym gorszej jakości wykonywanej operacji,
- dużych różnic między torem zaprogramowanym a odtwarzanym, powstających na skutek obciążeń mechanizmu jednostki kinematycznej w trakcie programowania.

Pomiary obciążeń elementów mechanizmów jednostki kinematycznej powstających np. w wyniku transportowania mas lub podczas wykonywania zadania montażowego prowadzone są w celu uniknięcia następstw w rodzaju gwałtownego zwiększania błędu pozycjonowania lub odtwarzania toru, spadku prędkości ruchu czy powstawania nadmiernych drgań.

Rozróżnia się drgania:

- powstające samoistnie, bez doprowadzenia energii zewnętrznej, podczas ruchu zespołów jednostki kinematycznej, w szczególności w fazie przyśpieszania lub hamowania,
- wymuszone, powstające w wyniku oddziaływania na elementy mechaniczne jednostki kinematycznej sił zewnętrznych, przenoszonych np. od napędów.

Celem pomiarów jest określenie sztywności dynamicznej jednostki kinematycznej, wartości tłumienia i częstotliwości rezonansowej. Parametry te mają decydujący wpływ na czas trwania cyklu pracy, dokładności pozycjonowania i odtwarzania toru ruchu. Pomiary drgań odbywają się najczęściej w układzie trójwymiarowym za pomocą piezoelektrycznych lub indukcyjnych mostkowych czujników bezwładnościowych.

11.6. Badania eksploatacyjne

Podstawowym elementem badań eksploatacyjnych są pomiary parametrów energetycznych. Dotyczą one zarówno poboru energii, którego wartość jest niezbędna do obliczenia bilansu energetycznego robotyzowanego stanowiska, a tym samym kosztów produkcji na danym stanowisku. Określane są wartości średnie i maksymalne poboru energii, odpowiadające zróżnicowanym warunkom obciążenia maszyny, Podczas badań bardzo istotne jest zachowanie maszyny po nagłym zaniku zasilania. Do tej samej grupy zaliczyć należy pomiary wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego na pracę układów sterowania maszyny manipulacyjnej. Podczas pomiaru emisji hałasu mierzone jest:

- ciśnienie,
- poziom,
- częstotliwość dźwięku.

Innym elementem pomiarów eksploatacyjnych jest pomiar emisji cieplnej. Dotyczą one:

- właściwej emisji cieplnej, której głównym źródłem jest pracujący układ zasilania i pracujące układy napędowe jednostki kinematycznej,
- przebiegu fali cieplnej w jednostce kinematycznej, szczególnie chwytaka lub narzędzia, w przypadku pracy z nagrzanym obiektem lub w pobliżu źródeł ciepła,
- wpływu zmian temperatury jednostki kinematycznej, przede wszystkim na dokładność pozycjonowania i odtwarzania toru ruchu, jak również na pozostałe parametry kinematyczne, dynamiczne i eksploatacyjne.

Mierzone są zmiany temperatury w wybranych, niewrażliwych punktach mechanizmu jednostki kinematycznej oraz czas osiągnięcia równowagi cieplnej. Pomiary cieplne wykonywane są przeważnie za pomocą elastycznych termoelementów foliowych (miedz – konstantan) o grubości ok. 0.1mm.

12. ASPEKTY EKONOMICZNE I SOCJALNE ROBOTYKI

12.1. Wprowadzenie

Stosowanie robotów przemysłowych, uznanych w latach sześćdziesiątych za odrębne urządzenia, obok systemów komputerowo wspomaganego projektowania CAD i wytwarzanie CAM charakteryzuje obecne tendencje w automatyzacji procesu wytwarzania. Techniki te będą dominującymi w automatyzacji i robotyzacji przemysłowej do momentu pojawienia się kolejnej zmiany, której zasięg jest wciąż jeszcze nieznan.

W obecnych zastosowaniach robotów przemysłowych, z reguły dominują zadania proste i powtarzalne, niewymagające wysokich dokładności. W latach dziewięćdziesiątych ekonomiczne obszary zastosowań robotyzacji wyznaczały stosunkowo proste zadania, jak np. obsługa maszyn, transport materiałów malowanie i spawanie. Obecnie zadania robotów są bardziej zaawansowane.

Współczesna robotyka przemysłowa zajmuje się zastosowaniem robotów i manipulatorów przemysłowych do robotyzacji takich procesów jak odlewnictwo, spawalnictwo, lakiernictwo, obsługa pras, montaż i wiele innych procesów, które wymagają dużego wysiłku fizycznego i są często szkodliwe, monotonne i niebezpieczne dla zdrowia obsługi.

Szczególny rozwój robotów następuje w związku z badaniami, eksploatacją i eksploracją dna morza, na innych planetach i w przestrzeni kosmicznej. Należy tu także wspomnieć o zastosowaniach robotów w medycynie, handlu i obsłudze.

Zastosowanie robotów przemysłowych w ostatnich latach daleko wybiega poza przemysł elektromaszynowy i wkracza do takich przemysłów jak górnictwo, hutnictwo, odlewnictwo, rolnictwo, transport, budownictwo, łączność, chemia, leśnictwo.

Robotyka i elastyczna automatyzacja produkcji stały się nowymi obszarami wiedzy naukowej i twórczej działalności technicznej, korzystającej z dorobku mechaniki, elektrotechniki, elektroniki, cybernetyki, informatyki i organizacji produkcji.

Współczesne obrabiarki, systemy obrabiarek i inne zautomatyzowane urządzenia technologiczne są złożonymi systemami, zaliczanymi do systemów mechatronicznych. Powstaje nowa gałąź wiedzy pod nazwą "mechatronika", której rozwój, opanowanie i wykształcenie specjalistycznej kadry inżynierów "mechatroników" jest nieodzownym warunkiem stopniowego przychodzenia do komputerowo zintegrowanej produkcji CIM, co powoduje powstawanie fabryk bezludnych, fabryk przyszłości.

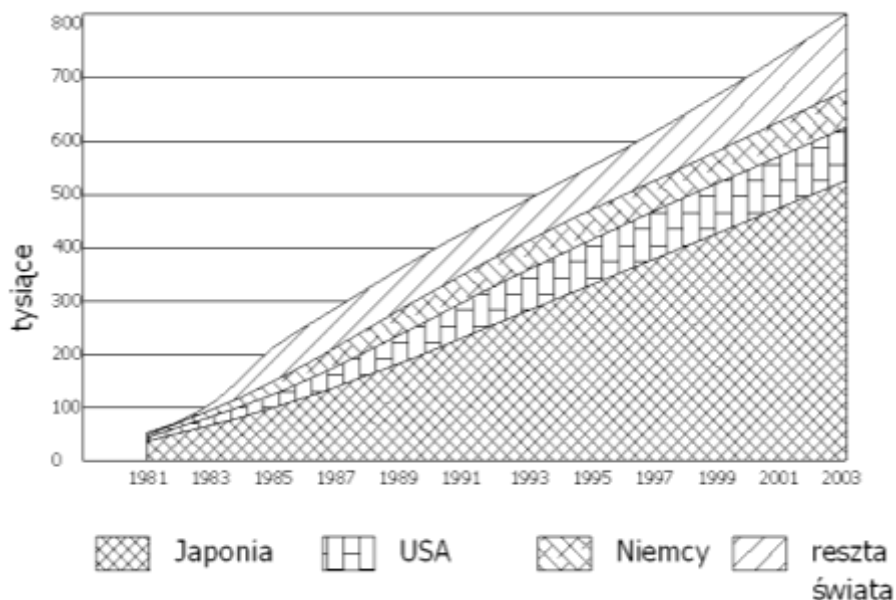
Nazwy bezludna produkcja, bezludna fabryka pojawiły się dla określenia systemów wytwórczych obsługiwanych przez stałą załogę stanowiącą od jednego do kilku procent personelu, który byłby potrzeby do wykonywania tych samych zadań współczesnymi metodami konwencjonalnymi. Fabryka bezludna ma być elastycz-

nym systemem wytwórczym, sterowanym komputerowo, będącym w stanie wytwarzać równolegle zestawy różnych wyrobów w różnolichnych partiach.

Można wyróżnić następujące główne funkcje systemu: konstruowanie wyrobu, planowanie produkcji, kształtowanie części, przemieszczania materiałów, montaż części i podzespołów, kontrola części podzespołów i zespołów oraz organizacja informacji produkcyjnej.

12.2. Stan robotyki w krajach i na świecie

Ocenia się, że obecnie produkuje się ok. 800 typów robotów i manipulatorów przemysłowych wytwarzanych przez ponad 450 firm w tym 270 z Japonii, 80 z USA i 100 z Europy *rys.12.1.*



Rys.12.1. Wzrost robotyki w danym kraju

Podstawowymi motywami zastosowania robotów przemysłowych w krajach rozwiniętych w systemach zautomatyzowanej i zrobotyzowanej produkcji są następujące czynniki:

- dążenie do obniżenia siły roboczej,
- możliwość zastąpienia człowieka na stanowiskach niebezpiecznych i uciążliwych dla zdrowia i życia,
- możliwość podwyższenia jakości produkcji,
- możliwość zwiększenia wydajności (2 - 3 razy),
- dążenie do oszczędnego wykorzystania surowców i materiałów produkcyjnych,
- dążenie do zwiększenia elastyczności systemu produkcyjnego

Przewidywane korzyści gospodarcze są trudne do oceny, gdy automatyzacja i robotyzacja jest dziś warunkiem nowoczesnego produkowania, a nowoczesne i wysokojakościowe produkowanie jest warunkiem przeżycia w nasilającej się walce konkurencyjnej na rynkach międzynarodowych. Trzeba wyraźnie podkreślić, że społeczeństwa niezdolne do nadążania za postępem automatyzacji i robotyzacji zachodzących w świecie będą nieuchronnie spychane do roli wykorzystywanych i cynicznie eksploatowanych "ubogich krewnych" w rodzinie ludzkiej.

Tak, więc argumenty natury ekonomicznej przemawiające za możliwie szybką i możliwie wszechstronną automatyzacją i robotyzacją naszego przemysłu są istotne i ważne, ale słuszniejszym wydaje się być mówienie o społecznej konieczności automatyzacji i robotyzacji, a to z uwagi na:

- konieczność podniesienia standardu wyrobów (zwłaszcza eksportowanych), wytwarzane tradycyjnymi technologiami przestają lub przestały być konkurencyjne,
- konieczność wzrostu wydajności pracy,
- konieczność podniesienia na przyzwoity poziom warunków BHP.

12.3. Aspekty ekonomiczne i społeczne

Rozwój zastosowania robotów i w ogóle wprowadzenie postępu technicznego, zależy od zmieniającej się równowagi trzech czynników:

- 1) możliwości technicznej,
- 2) opłacalności ekonomicznej,
- 3) implikacji społecznej.



Rys.12.2. Zakres opłacalnego zastosowania robotów do montażu

Głównym efektem ekonomicznym, automatyzacji i robotyzacji jest zwiększenie wydajności procesów technologicznych, zmniejszenie zużycia energii i surowców. Zasadniczym skutkiem jest również zmniejszenie zatrudnienia.

W krajach wysoko uprzemysłowionych względy ekonomiczne wyznaczają pewien zakres "niszę ekonomiczną" zastosowania robotów. Dla przykładu automatycznego montażu jest ona uwidoczniiona na *rys. 12.2*.

Do wyrażenia efektu ekonomicznego konkretnego zastosowania robota jest zazwyczaj stonowany okres zwrotu nakładów.

Okres zwrotu nakładów poniesionych na zastosowanie robota, w największym uproszczeniu jest określony wzorem:

$$T = \frac{I}{K_r - K_a}$$

gdzie:

- T – okres zwrotu nakładów (w latach),
- I – poniesione nakłady inwestycyjne,
- K_r – roczny koszt pracy ręcznej zastępowanej pracą robota,
- K_a – roczny koszt eksploatacji robota.

Wzór ten na ogół bywa modyfikowany przez wprowadzenie wielkości odzwierciedlających dodatkowe zjawiska i aspekty związane z zastosowaniem robota. Wzór na okres zwrotu nakładów z uwzględnieniem zmiany wielkości produkcji ma postać:

$$T = \frac{I}{K_r - K_a \pm q(K_r + A)}$$

gdzie:

- q – współczynnik wyrażający zmianę (przyrost lub zmniejszenie) wielkości produkcji w wyniku zastosowania robota,
- A – roczny koszt amortyzacji (spadek wartości) urządzeń obsługiwanych przez robot oraz wyposażenia dodatkowego stanowiska.

Wzór na okres zwrotu nakładów z uwzględnieniem efektów powstających w skali całej gospodarki można zapisać np. w postaci:

$$T = \frac{(I_1 - I_2)(1+r)^a}{(K_{r2} - K_{r1}) \frac{1}{(1+r)^b} + (O_s + \Delta K_{wo}) i_{zm}}$$

gdzie:

- I_1 – nakłady na zakup robota, maszyn, urządzeń oraz uruchomienie stanowiska pomniejszone o wartość odsprzedanych maszyn używanych przez automatyzację,
- I_2 – nakłady inwestycyjne związane z zakupem maszyn, urządzeń oraz uruchomieniem stanowiska w porównywalnym wariantcie pracy ręcznej, po-

mniejszone o wartość niezamortyzowanych urządzeń w ostatnim roku przed podjęciem analizy,

K_{r2} – koszt produkcji rocznej stanowiska w wariacie pracy ręcznej,

K_{ra1} – koszt produkcji rocznej stanowiska zautomatyzowanego pomniejszonym o amortyzację maszyn i urządzeń zastosowanych w tym wariacie,

O_s – efekt powstały na skutek zmniejszenia zatrudnienia, wyrażony w postaci dodatkowego rocznego zysku, jaki wypracują pracownicy przesunięci do innych zadań produkcyjnych,

ΔK_{wo} – różnica kosztów wydatków socjalno-oświatowych z funduszy społecznych na skutek zmniejszenia liczby pracowników,

r – stopa dyspontowa (w %),

i_{zm} – liczba zmian pracy,

a – czas budowy oraz wdrażania stanowiska zautomatyzowanego (w latach),

b – liczba kolejna oznaczająca rok, w którym obliczono roczne efekty od czasu osiągnięcia założonej zdolności produkcyjnej.

Implikacje społeczne zastosowań robotów są różnokierunkowe i niejednakowe w różnych krajach, przy czym problem jak na razie pojawił się tylko w krajach wysoko uprzemysłowionych.

12.4. Perspektywy rozwoju robotyzacji

Oczywistą tendencją rozwojową, taką samą w budowie robotów jak i innych urządzeń technicznych, jest dążenie do polepszenia charakterystyk i podniesienia niezawodności przy obniżce kosztów wytwarzania i kosztów eksploatacji. Rozwijane są służące temu celowi techniki konstruowania wspomagane komputerowo, umożliwiające dobór optymalnych parametrów rozwiązania konstrukcyjnego.

Jeden z kierunków poszukiwania ma na celu eliminację przekładni mechanicznych. Rozwiązania polegają na umieszczeniu specjalnych silników elektrycznych prądu stałego bezpośrednio w przegubach robota o antropomorficznym schemacie konstrukcyjnym. Są to silniki o dużym momencie i małej prędkości, zbudowane przy użyciu materiałów magnetycznych z pierwiastków ziem rzadkich (samar-kobalt).

Innym kierunkiem jest stosowanie rozwiązań biomechanicznych podpatrzonych u zwierząt i człowieka. W współczesnych robotach stosowana jest zasada, że każdy stopień swobody (oś robota) ma własny element napędowy, który nie jest używany do napędu innej osi.

Kierunkiem rozwoju o wielkim znaczeniu jest wyposażenie robotów w czujniki zewnętrzne i układy sensoryczne a więc budowa robotów II generacji.

Dalszy rozwój, zbudowanie robotów III generacji wiąże się z badaniami nad sztuczną inteligencją i wykorzystaniem ich rezultatów w systemach sterowania robotów.

Systemy I generacji będą w stanie wytwarzać dobra materialne pod nadzorem tylko nielicznego zespołu ludzi. Wytworzenie samego systemu, jego przekształcenie do nowych zadań i regeneracja zdolności wytwórczych muszą być dokonywane przez siły sprawcze pochodzące spoza systemu.

Następnym etapem rozwoju będą bezludne systemy wytwórcze II generacji, mające zdolność do samoregeneracji, tzn. do samodzielnego podtrzymywania swoich, właściwych dla danego systemu zdolności do wytwarzania dóbr materialnych. Przejście od systemu z generacji I do II będzie płynne, a pewne elementy rozwiązań samoregeneracyjnych istnieją już dziś w formie początkowej np. automatyczna korekta zużycia i wymiana narzędzi. Można przypuszczać, że przejście do systemu II generacji, choć związane z wprowadzaniem zupełnie nowych, nieznanych dziś rozwiązań technicznych nie spowoduje jeszcze gruntownej zmiany form produkcji przemysłowej.

I wreszcie bezludne systemy wytwórcze generacji III będą miały zdolność nie tylko do samoregeneracji, ale i do samoprzekształcania się w celu wypełnienia zadań sformułowanych w formie ogólnej przez człowieka (w ostatniej instancji, bo w przypadku hierarchicznej struktury systemów automatycznych w konkretnym przypadku zadanie dla systemu może formułować system nadrzędny). Pojawienie się systemów w III generacji będzie związane z powstaniem zupełnie nowych form produkcji przemysłowej.

Blisko połowa wartości produkcji przemysłowej powstaje jako wynik procesów technologicznych o ciągłych i jednorodnych strumieniach materiałów. Pozostała część w wyniku procesów dyskretnych, dających wyroby liczone na sztuki i w większości przypadków mających złożoną budowę.

Roboty przemysłowe są jednym z podstawowych środków automatyzacji dyskretnych procesów technologicznych. Rozwiązania techniczne powstające w tej dziedzinie będą miały wpływ na rozwój innych dziedzin, a rozwój produkcji robotów może zaowocować znaczącym w gospodarce światowej nową gałęzią przemysłu.

Przyszłym polem automatyzacji i robotyzacji dóbr materialnych będą procesy zachodzące w środowisku naturalnym, przemysłowe procesy są prowadzone w sztucznym środowisku wytworzonym przez człowieka. Jest to środowisko uporządkowane lub dające się uporządkować, stanowiące pewien świat uproszczony. Dlatego automatyzacja i robotyzacja procesów wytworzonych w tym świecie przemysłowy jest stosunkowo łatwa. Znacznie jednak bogatszy jest świat naturalny, na którego uporządkowanie nie mamy wpływu.

Jeden z tych procesów odbywać się może w skrajnie niesprzyjających człowiekowi warunkach, jakie panują np. na dnie oceanu lub w kosmosie. Skuteczna automatyzacja i robotyzacja niepowodująca marnotrawstwa ani dewastacji środowiska, będzie tu wymagała środków technicznych mających znaczne możliwości percepcyjne i intelektualne.

Tak rysuje się dziś przyszłość robotów przemysłowych. Zniszczyć tę perspektywę lub opóźnić rozwój mógłby krach gospodarki światowej i ogólny regres techniczny.

13. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

1. Craig J. J.: *Wprowadzenie do robotyki*, WNT, Warszawa, 1995.
2. Jędrzykiewicz Z.: *Elementy i układy hydrauliczne*, Skrypt uczelniany AGH, Kraków, 1981.
3. Morecki A., Knapczyk J.: *Podstawy robotyki*, WNT Warszawa 1999.
4. Niederliński A.: *Roboty przemysłowe*, WSiP, Warszawa 1981.
5. Olszewski M., Barczyk J., Falkowski J. L., Kościelny W. J.: *Manipulatory i roboty przemysłowe – automatyczne maszyny manipulacyjne*, WNT, Warszawa, 1992.
6. Spong M. W., Vidyasagar M.: *Dynamika i sterowanie robotów*, WNT, Warszawa, 1997.