

## **KIERUNKI ROZWOJU NAPĘDÓW MANIPULATORÓW STEROWANYCH PROGRAMOWALNYMI STEROWNIKAMI STOSOWANYCH PRZY AUTOMATYZACJI PRAC ZA- I WYŁADOWCZYCH W ESP**

*W artykule dokonano przeglądu napędów stosowanych w manipulatorach sterowanych programowalnymi sterownikami przemysłowymi.*

Rosnąca konkurencja stanowi istotną przyczynę dążenia producentów do podwyższenia produktywności i poprawy jakości swego produktu. Jednym ze środków prowadzących do tego celu jest automatyzacja procesu produkcyjnego. Wśród narzędzi niezbędnych w automatyzacji, oprócz sterowników i systemów czujnikowo-pomiarowych, znajdują się różnorodne napędy.

Celem niniejszej publikacji jest dokonanie przeglądu specyficznych wymagań stawianych napędom sterowanym programowalnymi sterownikami przemysłowymi, pracującymi w elastycznych systemach produkcyjnych. Analiza właściwości poszczególnych napędów pozwala na wskazanie ich zalet i wad, co pomaga w prawidłowym doborze napędu do konkretnego zadania. Przy omawianiu napędów ograniczono się do ich części wykonawczej.

W niniejszej pracy pod pojęciem elastycznych systemów produkcyjnych rozumie się wszystkie systemy produkcyjne, które w sposób automatyczny dostosowują swe parametry technologiczne do zmieniającego się produktu.

### **1. WYTYCZNE DOBORU NAPĘDÓW MANIPULATORÓW PRACUJĄCYCH W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH**

Programowalne sterowniki przemysłowe bardzo dobrze nadają się do współpracy ze wszelkimi napędami. W przypadku sterowania napędami dwustanowymi pneumatycznymi, hydraulicznymi bądź elektrycznymi wykorzystuje się moduły wyjść cyfrowych. Przy sterowaniu serwonapędami stosuje się moduły wyjść analogowych o standardowym zwykle sygnale stałonapięciowym 0-10 V lub stałoprądowym 4-20 mA.

Nowoczesna technika napędów niesie ze sobą niezwykle szeroką ofertę. Optymalny wybór może zostać dokonany po dokładnej analizie kryteriów, wśród których wymienić należy:

- stopień wymaganej elastyczności użytego napędu,
- warunki otoczenia, a w szczególności temperatura i jej wahania, wilgotność, środowisko agresywne (pary i gazy), warunki zagrożenia wybuchem itp.,
- dokładność i powtarzalność,
- maksymalną prędkość,
- przenoszone masy lub występujące obciążenia zewnętrzne,
- zasięg ruchu,
- trwałość,
- czas ruchu,
- charakter pracy,
- wymaganą niezawodność, w tym skutki ewentualnej awarii,
- możliwość konserwacji i serwisowania,
- sposoby doprowadzenia energii.

### **Stopień wymaganej elastyczności użytego napędu**

Podstawową trudnością stojącą przed manipulatorami i napędami pracującymi w elastycznych systemach produkcyjnych jest zmienność wymiarów i mas przenoszonych detali. Oznacza to konieczność automatycznego dostosowania zakresu, a czasem też i prędkości ruchu, do konkretnego detalu. W skrajnych, choć nie rzadkich przypadkach, wymaga się zmiany zakresu ruchu, a czasem też prędkości w każdym kolejnym cyklu.

Przy elastyczności ograniczonej do dwu, trzech wariantów możliwe jest stosowanie napędów dwustanowych, np. silowników pneumatycznych lub hydraulicznych. W przypadku konieczności adaptacji trajektorii do większej liczby wariantów niezbędne jest zastosowanie serwonapędów. W tych przypadkach adaptacja następować będzie na drodze programowej.

### **Warunki otoczenia**

Warunki otoczenia często decydują o doborze techniki napędu. W środowisku zagrożonym wybuchem, w warunkach podwyższonej wilgotności często mogą być stosowane jedynie napędy plynowe. Producenci napędów elektrycznych oferują wykonania Ex (dla środowisk zagrożonych wybuchem), o stopniu ochrony IP 66 lub wyższym, odpornych na narażenia parą wodną lub bryzgami wody, należy jednak liczyć się z tym, że wykonania specjalne oznaczają wyższe koszty (co najmniej 10 do 50%) oraz dłuższy czas realizacji zamówienia.

Przy analizie doboru techniki napędu, należy też uwzględnić występujące często różnice pomiędzy narażeniem samego napędu a narażeniem jego sterowania, które w skrajnych przypadkach może być oddalone o wiele metrów i znajdować się w innym pomieszczeniu i w innych warunkach.

Sterowania napędów oraz same połączenia mogą być narażane na zakłócenia elektromagnetyczne, dlatego też mogą wystąpić zakłócenia nawet w przypadku stosowania napędów płynowych sterowanych za pomocą długich przewodów oraz wyposażonych w czujniki z przewodami ułożonymi w pobliżu przewodów energetycznych. W przypadku elektrycznych serwonapędów prawidłowe ekranowanie i prowadzenie przewodu pomiędzy sterownikiem a silnikiem może stanowić jeden z istotnych warunków niezawodnej pracy napędu.

### **Dokładność i powtarzalność**

Jest to jeden z podstawowych parametrów napędu. Do najdokładniejszych należą mikronapędy piezoelektryczne lub magnetostrykcyjne, które pozwalają na osiągnięcie dokładności lepszej niż 1  $\mu\text{m}$ . Z wielu powodów napędy te mają jednak ograniczony zakres zastosowań.

Dokładności rzędu 0,01 mm osiągają serwonapędy elektryczne i hydrauliczne a także, w pewnych warunkach, silniki skokowe. W pewnych przypadkach, zwłaszcza przy niedużych obciążeniach, możliwa jest do osiągnięcia taka dokładność przy zastosowaniu napędów płynowych dwustanowych z mechanicznym zatrząskiem.

W przypadku wymaganej dokładności 0,1 mm możliwe są do wykorzystania serwonapędy pneumatyczne, napędy dwustanowe pneumatyczne bądź hydrauliczne pozycjonowane na zatrząskach.

Przy wymaganiach mniejszych dokładnościach lub stosowaniu pozycjonowania w położeniach zatrzymania możliwe jest stosowanie silników trójfazowych.

Przy doborze napędu obrotowego, realizującego ruch liniowy, należy uwzględnić błędy przekładni zwłaszcza przy wymaganej dużej powtarzalności ruchu. Najdokładniejsze są szlifowane przekładnie śrubowe toczne ze wstępnym napięciem. Przy doborze tego napięcia należy uwzględnić jego wpływ na trwałość przekładni oraz wzrost oporów ruchu.

### **Maksymalna prędkość**

Jeśli potrzebne są duże prędkości, można zastosować beztłoczkowe napędy pneumatyczne. Niektórzy producenci dopuszczają pracę z prędkością do 3,5 m/s. Przy zastosowaniu napędów o ruchu obrotowym ograniczenie prędkości liniowej wprowadzają przekładnie, np. przekładnia zębata paskowa dopuszcza pracę z prędkościami do 2 m/s, natomiast dla przekładni śrubowej tocznej graniczną prędkością jest zwykle 1 m/s. Również w odniesieniu do napędów płynowych tłoczkowych większość producentów nie dopuszcza pracy z wyższą prędkością niż 1m/s, choć można w tym względzie znaleźć wyjątki.

Przekroczenie prędkości dopuszczalnej przez producenta niesie ze sobą zmniejszenie trwałości napędu i utratę gwarancji w przypadku ewentualnej awarii, ale może być w pewnych przypadkach akceptowalne. W przypadku zastosowania napędu pneumatycznego należy sprawdzić, czy istnieją odpowiednie warunki zasilania, umożliwiające pracę z założoną prędkością.

## Obciążenia

Obciążenie manipulatora ma dwojaki charakter:

- obciążenie bierne w postaci bezwładności niesionej masy oraz oporów tarcia,
- obciążenie czynne w postaci sił zewnętrznych, w tym siły grawitacji.

Rozwiązanie zadania doboru napędu z punktu widzenia zapewnienia odpowiedniej dynamiki ruchu manipulatora, a w szczególności minimalizacji czasu wykonania ruchu na zadanej drodze, przy występowaniu obciążeń zewnętrznych, przedstawiono na licznych przykładach [4].

Należy podkreślić, że w przypadku konieczności rozwijania znacznych sił najkorzystniejsze jest stosowanie napędów hydraulicznych, charakteryzujących się największą mocą uzyskaną z jednostki ciężaru.

## Zasięg ruchu

W przypadku konieczności przemieszczania na wielometrowe odległości najwygodniejsze jest zastosowanie dowolnego napędu obrotowego z przekładnią paskową zębatą. Ostatnie lata przyniosły znaczny postęp w konstrukcji beztłoczkowych napędów pneumatycznych. Oferowane są obecnie napędy o skoku do 7 m.

## Trwałość

Parametr ten rzadko stanowi kryterium wyboru rodzaju napędu, jest jednak niezwykle istotny przy określaniu niezawodności napędu. Większość producentów napędów hydraulicznych gwarantuje co najmniej  $10^6$  zadziałań, choć czasami oferowane są rozwiązania o rząd lepsze. Standardem w napędach pneumatycznych jest  $10^7$  zadziałań.

Najkorzystniej pod tym względem prezentują się napędy elektryczne, zwłaszcza bezstykowe, których trwałość ograniczona jest przez trwałość łożysk. W przypadku prawidłowej zabudowy napędu (ograniczenia obciążeń poprzecznych i wzdłużnych wałka), trwałość napędu elektrycznego przekraczać może  $10^4$  godzin.

## Czas ruchu

Parametr ten ściśle wiąże się z siłą lub momentem, rozwijanymi przez napęd i jego mocą. Czas realizacji zadanego ruchu jest sumą czasu rozpędzania, ruchu jednostajnego i hamowania. Czas rozpędzania i hamowania jest zależny od siły lub momentu, rozwijanych przez napęd, bezwładności obciążenia oraz sił oporu. Natomiast czas ruchu jednostajnego zależy od parametrów kinematycznych napędu. Jest oczywiste, że w celu osiągnięcia minimalizacji czasu trwania ruchu należy dobierać napęd o możliwie dużym nadmiarze momentu lub siły w stosunku do występujących biernych i czynnych oporów ruchu. Natomiast parametry przełożenia mają wpływ niejednoznaczny: przy ruchu jednostajnym - im mniejsza

redukcja, tym krótszy czas wykonania ruchu na określonej drodze. W przypadku ruchu zmiennego zwiększenie redukcji skraca czas rozpędzania dzięki zmniejszeniu masy lub momentu bezwładności zredukowanych do osi napędu. Metody optymalizacji przedstawiono w [2, 4].

Dlatego przy doborze napędu, ze względu na kryterium czasu ruchu, należy wykonać obliczenia wstępne zakładając parametry, takie jak: momenty bezwładności i masy, siły oporów, siły tarcia, przelozienia, gdyż zwykle na tym etapie pracy dokładne wartości tych wielkości nie są jeszcze znane. Szczegółowe przykłady obliczeń przedstawiono w sprawozdaniu [4].

### **Charakter pracy**

Dla wielu napędów charakter pracy ma istotne znaczenie. Z punktu widzenia niezawodności pracy urządzeń rozróżnia się pracę:

- okresową,
- jednozmianową,
- tryzmiannową,
- ciągłą.

Silowniki pneumatyczne i hydrauliczne mają zwykle określoną w kilometrach trwałość uszczelnień. Z charakteru pracy wynika częstotliwość wymiany uszczelnień, a więc rozwiązania konstrukcyjne zapewnienia dostępu do napędu. W przypadku wymaganej pracy ciągłej, o zmiennym obciążeniu momentem lub prędkością napędów elektrycznych, należy to skonsultować z producentem napędu.

### **Niezawodność**

Niezawodność pracy każdego urządzenia jest jednym z jego podstawowych parametrów i o problemach tych traktuje cała rozwijająca się prężnie gałąź wiedzy. Chciałbym zwrócić uwagę czytelnika na jeden tylko aspekt tego zagadnienia. W procesie wyboru napędu cały czas dokonywane jest poszukiwanie rozwiązania optymalnego; w tym przypadku chodzi o znalezienie napędu możliwie taniego i wystarczająco niezawodnego. Kluczem jest tu pojęcie „wystarczająco”. Należy rozważyć skutki awarii napędu, bo jeżeli jest to tylko zatrzymanie procesu i zmniejszenie liczby wyprodukowanych detali, koszty awarii można uznać za niewielkie. Jeżeli jednak awaria napędu spowodować może uszkodzenie maszyny lub linii produkcyjnej o wielkiej wartości lub zatrzymanie wysoko wydajnego procesu na dłuższy czas, straty mogą być ogromne.

Najważniejsze jednak jest bezpieczeństwo obsługi lub osób postronnych. W przypadku możliwości wystąpienia zagrożenia zdrowia lub życia ludzkiego przez awarię napędu niezbędne jest zastosowanie najwyższej jakości napędów z systemem przeciwwawaryjnym (podwojone napędy, napędy rezerwowe w stanie gotowości, blokady bezpieczeństwa itp.).

W ciągu ostatnich lat nastąpił zdecydowany postęp w zakresie unormowania bezpiecznego użytkowania urządzeń, w tym napędów. W tablicy 1 przedstawiono kilka dyrektyw i norm określających wymagania w tym zakresie:

**Tablica 1.**  
Zestaw wybranych dyrektyw i norm dotyczących bezpieczeństwa użytkowania napędów

Nr	Nazwa
91/368EWG	Dyrektywa Rady Europy z 20.06.91 r. w sprawie ujednoczenia przepisów prawnych, dotyczących bezpieczeństwa maszyn, zmieniająca wydanie z 1989 r.
89/336/EEC	Dyrektywa w sprawie ujednoczenia przepisów prawnych dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej
PrPN-ISO 11161	Systemy automatyki przemysłowej - Bezpieczeństwo zintegrowanych systemów wytwarzania - Wymagania podstawowe
PN-87/M-73007	Napędy i sterowania hydrauliczne - Ogólne wymagania bezpieczeństwa
PN-83/Z-08200	Ochrona pracy. Maszyny i urządzenia produkcyjne - Ogólne wymagania bezpieczeństwa.
PN-84/Z-08202	Ochrona pracy - Elementy sterownicze maszyn i urządzeń produkcyjnych - Ogólne wymagania bezpieczeństwa
PN-88/Z-08209	Ochrona pracy - Urządzenia blokujące do maszyn i urządzeń produkcyjnych - Ogólne wymagania bezpieczeństwa

### Możliwość konserwacji i serwisowania

Ta ważna cecha związana jest przede wszystkim ze sposobem zabudowania napędu. Istotne jest natomiast ograniczenie częstotliwości dostępu do napędu w przypadku zastosowania go w urządzeniach pracujących ciągle, bez możliwości ich odłączenia. W takim przypadku zaleca się stosowanie napędów (przede wszystkim elektrycznych), które nie wymagają serwisowania.

### Sposoby i możliwości doprowadzenia energii

Problem ten trzeba rozważyć w przypadku doboru techniki napędu. Często doprowadzenie energii hydraulicznej bądź elektrycznej może być utrudnione.

## 2. NAPĘDY PNEUMATYCZNE

Napędy pneumatyczne stosuje się od wielu lat jako podstawowy napęd we wszelkiego rodzaju manipulatorach. Jego popularność nie maleje, co można tłumaczyć m.in. stałym rozwojem konstrukcji, a w szczególności:

- opracowaniem pneumatycznych zaworów proporcjonalnych, co poszerzyło zakres zastosowań napędów pneumatycznych o zadania wymagające dostosowania się do oczekiwań elastycznych systemów produkcji,
- opracowaniem coraz to nowych rozwiązań konstrukcyjnych, ułatwiających bezpośredni montaż (silowniki krótkoskokowe),
- wyposażeniem silowników w dodatkowe elementy ułatwiające ich współpracę ze sterownikami programowalnymi,
- opracowaniem silowników o owalnych tłokach, co upraszcza konstrukcję manipulatorów,
- opracowaniem długoskokowych silowników beztłoczyskowych, charakteryzujących się dużymi prędkościami ruchu,
- upowszechnieniem uszczelnień umożliwiających pracę na suchym powietrzu, co pozwala na zastosowanie napędów pneumatycznych w obszarach o wymaganej podwyższonej czystości (np. przemysł spożywczy, niektóre technologie przemysłu chemicznego itp.).

Do zalet napędów pneumatycznych zaliczyć należy:

- niską cenę,
- dużą niezawodność,
- łatwość konserwacji,
- możliwość pracy w warunkach zagrożenia wybuchem oraz w agresywnej atmosferze,
- łatwość sterowania.

W tablicy 2 przedstawiono jedynie podstawowe parametry napędów stosowanych w manipulatorach.

W celu zapewnienia wygody użytkownika producenci oferują silowniki już wyposażone w czujniki położenia tłoka oraz nastawiane zawory hamowania ruchu krańcowego. Ponadto istnieje możliwość zainstalowania hamulca na tłoczysku utrzymującego silownik w danej pozycji niezależnie od obciążenia mechanicznego oraz spadku ciśnienia zasilania. Innym udogodnieniem jest oferta kompletu, na który składają się: silownik + prowadnice.

Powyższe rozwiązania mają na celu oferowanie kompletnego napędu, wyposażonego przez producenta w elementy ułatwiają jego pracę w zautomatyzowanej linii sterowanej sterownikiem przemysłowym.

**Tablica 2.** Zestawienie podstawowych parametrów użytkowych napędów pneumatycznych

Napęd	Parametry
Silowniki beztłoczkowe	Maksymalny skok 6.800 mm
	Maksymalna siła 1.870 N
	Dopuszczalna prędkość 3,5 m/s
Silowniki wahliwe	Maksymalny moment obr. 150 Nm
	Maksymalny kąt obrotu 360°
Silowniki tłoczkowe	Maksymalny skok 2.000 mm
	Maksymalna siła 43,4 kN
	Dopuszczalna prędkość 2 m/s

### 3. NAPĘDY ELEKTRYCZNE

#### Napędy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego

Do zalet tych napędów należy:

- niska cena,
- duża niezawodność,
- prostota obsługi i konserwacji.

Wśród podstawowych wad wymienia się:

- niewielką dokładność i powtarzalność,
- niewielki moment startowy,
- ograniczone możliwości hamowania.

Napędy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego stosowane są przeważnie w dwu rozwiązaniach:

- do zapewnienia przemieszczenia na dłuższym odcinku o zadany skok,
- do napędu transporterów taśmowych, rolkowych itp.; urządzenia te nie wchodzi wprawdzie w zakres niniejszej pracy, ale wiążą się ściśle z systemami załadowniczo-rozładowniczymi i manipulacyjnymi pracującymi w ESP.

W pierwszym przypadku napęd składa się zwykle z:

- silnika prądu przemiennego,
- przekładni pasowej zębatej,
- przemiennika częstotliwości,



- czujników dwustanowych, potwierdzających wybrane położenia,
- konstrukcji nośnej,
- zespołów pozycjonowania w wybranych miejscach (np. zatrząsków).

Przemiennik częstotliwości zapewnia łagodny start i hamowanie oraz możliwość doboru prędkości. Czujniki są niezbędne do zapewnienia właściwego sterownia ruchem i pozycjonowaniem napędu. Mechaniczne pozycjonowanie zapewnia dokładność zatrzymania w żądanym miejscu, ponieważ sposób sterowania silnika wyklucza zachowanie wymaganej zwykle powtarzalności. Jednocześnie zatrząski mogą utrzymać zadane położenie w przypadku występowania sił czynnych (np. grawitacji) w miejscu zatrzymania, zwłaszcza przy znacznej wartości tych sił. Od konstrukcji nośnej wymaga się odpowiedniej sztywności i tłumienia drgań występujących podczas ruchu i hamowania, co ma szczególne znaczenie przy ruchu znacznych mas oraz znacznych przyspieszeniach lub opóźnieniach.

Elastyczność tego napędu jest ograniczona możliwą do zastosowania liczbą zatrząsków. Pozostałe elementy można nastawiać wybierając odpowiednie parametry z programu sterownika.

W drugim przypadku w skład napędu wchodzi zwykle:

- silnik prądu przemiennego,
- reduktor,
- przemiennik częstotliwości,
- napęd taśmociągu,
- czujniki.

Przy doborze elementów należy pamiętać, że w przypadku pracy indeksowej transportera za każdym razem następuje start i zatrzymanie całej poruszającej się po transporterze masy, co stwarza trudne warunki pracy zarówno dla silnika jak i reduktora i wymaga często znacznej nadwyżki mocy i momentu w celu zapewnienia niezawodnej pracy. Indeksowy tryb pracy jest bardzo często stosowany w systemach transportu międzyoperacyjnego. Elastyczność takiego napędu zapewnia programowalny sterownik.

Powszechniejsze w ciągu ostatnich lat stosowanie silników prądu przemiennego w manipulatorach umożliwiły przemienniki częstotliwości charakteryzujące się:

- płynną regulacją prędkości obrotowej silników,
- możliwością zdalnego sterownia z komputera, najczęściej przez złącza RS 232 i RS 485,
- możliwością programowania zakresu częstotliwości, dynamiki momentu rozruchowego, charakterystyki momentu w funkcji częstotliwości itp.,
- elektronicznym blokowaniem silnika w stanie zatrzymania (w ograniczonym zakresie),
- możliwością pracy jako regulatory P, PI, PID.

Zestaw silnika prądu przemiennego z przemiennikiem częstotliwości stanowi w wielu zastosowaniach wygodną i tanią alternatywę w porównaniu do wielu innych technik napędów.

## NAPĘDY Z SILNIKAMI SKOKOWYMI

Napęd taki składa się zwykle z:

- silnika skokowego ze sterownikiem,
- przekładni; zestaw najczęściej stosowanych przekładni przedstawiono w pkt 7 niniejszej pracy,
- czujnika położenia zerowego (in home).

Napędy te charakteryzują się stosunkowo niską ceną przy wysokiej dokładności i niezawodności. Czujnik położenia zerowego pełni ważną funkcję korekty położenia ze względu na możliwość „zgubienia” jednego skoku. W przypadku długotrwałej pracy taki błąd może narastać. Okresowa korekta wykonywana automatycznie co pewien czas (nadzorowana przez programowalny sterownik) zapewnia utrzymanie żądanej powtarzalności.

W tablicy 3 podano przykłady niektórych silników i ich podstawowe parametry. Wśród nowych rozwiązań silników widać tendencję do:

- poszerzania zakresu wielkości,
- oferowania silników w wykonaniu bryzgoszczelnym,
- zmniejszania kąta skoku,
- oferowania silników wyposażonych nie tylko w przekładnię i hamulce ale też w elementy ułatwiające ich współpracę ze sterowaniem automatycznym (kodery lub rezolwery).

**Tablica 3.**

Zestawienie podstawowych parametrów mechanicznych wybranych silników skokowych.

Producent	Typ	Podstawowe parametry
Phytron-Elektronik	RSS i RSH ZSS	Skok 1,8°, moment 0,65 do 14,5 Nm, wykonanie w klasie IP 54 (lub IP 65) Skok 0,72° do 45°, moment 0.03 do 0,5 Nm, możliwość wyposażenia w koder, przekładnię, hamulec
Berger Lahr	RDM VRDM	Skok 1,8° do 15°, moment 0,016 do 0,1Nm, Skok 0,72/0,36°, moment 0,3 do 10 Nm, silnik 5/10 faz,
Kollmorgren	PJT STM PB	Skok 1,8°, moment 0,19 do 0,78 Nm, Skok 1,8°, moment 1,1 do 3,21 Nm, Skok 0,72/0,36°, moment 0,19 do 0,78 Nm, silnik 5/10 faz,
Portescap	escap® P	Skok 1,8° do 6°, moment 0,01 do 1,55 Nm,

W przypadku zastosowania specjalnego sterowania możliwe jest wykonywanie skoków o kącie stanowiącym niewielki ułamek standardowego  $1,8^\circ$ .

Pewną odmianę stanowi skokowy napęd liniowy. Rozwiązanie to pozwala na eliminację drogich mechanizmów zamiany rodzaju ruchu. Oferowane napędy zapewniają prędkość do 1 m/s, przy powtarzalności  $\pm 0,005$  mm.

## NAPĘDY Z SILNIKAMI BEZZESTYKOWYMI

Silniki bezzestykowe są najbardziej predestynowane do wykorzystania w napędach manipulatorów ze względu na dużą dokładność, duży moment, dobrą dynamikę, odporność na nieprzyjazne warunki otoczenia oraz możliwość kontroli położenia we wszystkich fazach ruchu.

Typowy napęd składa się z: silnika, prądnicy tachometrycznej, kodera lub rezolwera, sterownika i zasilacza.

W ciągu ostatnich lat znacznie poszerzyła się lista producentów tych napędów. W tabeli 4 przedstawiono parametry czterech przykładowych firm produkujących te napędy. Napędy te oferowane są także w komplecie z przykładniami. Dla wygody użytkownika oferowane są także sterowania kilku napędów współpracujących ze sobą.

Tablica 4. Przykładowe parametry napędów bezzestykowych

Producent	Podstawowe parametry	
Allen Bradley	Moment	27,8 Nm
	Prędkość obrotowa do	5000 obr/min
	Wykonanie	IP 64
Indramat	Moment	12 Nm
	Prędkość obrotowa	9000 obr/min
	Podziałka do	24576 imp./obr
	Wykonanie	IP 65
	Możliwość pracy jako	silnik skokowy
IEL ZDI	Moment	23 Nm
	Prędkość obrotowa	4000 obr/min
Robert Bosch	Moment	66 Nm
	Prędkość obrotowa	6000 obr/min
	Czas osiągnięcia prędk. max	55 ms
	Podziałka kodera do	3600 imp./obr
	Wykonanie	IP 64

#### 4. NAPĘDY HYDRAULICZNE

Podstawowymi zaletami tych napędów są:

- duża moc w jednostce masy,
- dobra dynamika,
- duża dokładność przy zastosowaniu sterowania za pomocą wzmacniacza hydraulicznego lub rozdzielacza proporcjonalnego,
- odporność na środowisko agresywne,
- możliwość pracy w środowisku wybuchowym.

Wśród wad wymienia się:

- możliwość występowania przecieków,
- ograniczoną trwałość uszczelnień,
- konieczność prowadzenia przewodowania.

Dobrą dynamikę i dużą dokładność uzyskano dzięki zastosowaniu sterowań proporcjonalnych. W skład typowego serwonapędu hydraulicznego wchodzi:

- napęd (siłownik lub silnik),
- rozdzielacz proporcjonalny lub wzmacniacz hydrauliczny,
- czujnik położenia zabudowany często w cylindrze,
- sterownik rozdzielacza.

Niektórzy producenci oferują rozdzielacz z zabudowanym sterownikiem, który może być sterowany bezpośrednio z analogowego wyjścia programowalnego sterownika przemysłowego lub komputera klasy PC.

Stosowane są trzy rodzaje napędów hydraulicznych, których parametry nie zależą praktycznie od wybranego producenta (tablica 5).

Tablica 5. Podstawowe parametry napędów hydraulicznych

Napęd	Parametry
Siłownik	Siła do 150 kN, skok do 6000 mm,
Silnik	Prędkość obrotowa od 4 do 6000 obr/min, moment do 25 kNm
Silnik wahliwy	Kąt obrotu do 720°, moment do 600 Nm

Ostatnie lata przyniosły znaczne zmiany w napędach hydraulicznych wynikające z:

- upowszechnienia się sterowań elektronicznych i ich ścisłej współpracy z częścią wykonawczą (hydrauliczną),
- wdrażania płynów przyjaznych środowisku naturalnemu,
- postępu w opracowaniu cichobieżnych pomp.

Konsekwencją powyższych trendów w rozwoju hydrauliki było znalezienie nowych zastosowań oraz dostosowanie materiałów, przede wszystkim uszczelnień, do warunków pracy. Od konstrukcji manipulatorów wymaga się natomiast zapewnieniu łatwej wymiany płynów roboczych, której należy dokonywać częściej w przypadku stosowania płynów nie degradujących środowiska naturalnego.

## 5. MIKRONAPĘDY

Mikronapędy w ostatnich latach zrobiły ogromną karierę. Należy spodziewać się dalszego ich upowszechniania w wielu zastosowaniach, w których wykorzystywane są obecnie elektromagnesy. Zasadę działania oraz zjawiska zachodzące w tych napędach przedstawiono w sprawozdaniu [1]. Tam też zamieszczono liczne przykłady rozwiązań napędów o ruchu obrotowym i liniowym. W konstrukcjach tych wykorzystuje się znaczą siłę i dużą częstotliwość pracy (rzędu 20 kHz) dla wprowadzenia w ruch wirnika lub suwaka z niewielkim skokiem wynikającym ze skoku stosu płytek przetwornika piezoelektrycznego. Jednym z interesujących przykładów może być napęd piezoelektryczny wbudowany w przekładnię hydrokinetyczną.

W mikronapędach wykorzystuje się dwa zjawiska - piezoelektryczne i magnetostrykcję. Opracowanie niskonapięciowych (pracujących w przedziale 100-200 V) napędów piezoelektrycznych spowodowało ich upowszechnienie [5]. Wśród zalet tych napędów wymienia się:

- wysoką dokładność  $\sim 1$  nm,
- szybkość działania  $\sim 10$   $\mu$ s,
- dużą siłę z jednostki powierzchni  $\sim 30$  N/mm<sup>2</sup>.

Natomiast podstawową wadą jest niewielki skok rzędu do 0,15 do 1 mm. Napędy te mogą zastąpić silniki skokowe wszędzie tam, gdzie silniki te są zbyt wolne lub za mało dokładne. Duże siły i duża czułość umożliwiają wykorzystanie ich do konstrukcji osi manipulatora po zastosowaniu odpowiedniej przekładni mechanicznej. Przykład działania takiego napędu przedstawiono na rys. 1. W skład napędu wchodzi cztery silniki piezoelektryczne pracujące na przemian parami. Ich wahliwe zawieszenie powoduje, że w wyniku wydłużenia jednej pary następuje jednocześnie obrót o kąt wynikający z luzu pomiędzy wałem roboczym i silnikami i skoku. Obrót ten powoduje przemieszczenie wału o jeden skok. Naprzemienna praca silników umożliwia wykonywanie kolejnych skoków wału. Ze względu na dużą częstotliwość pracy silnika piezoelektrycznego, w zastosowaniach praktycznych osiągnąć można prędkości rzędu 25 mm/s przy skoku 0,3  $\mu$ m. Zwiększenie skoku pozwala na zwiększenie prędkości maksymalnej.

## 6. PRZEKŁADNIE MECHANICZNE STOSOWANE W NAPĘDACH MANIPULATORÓW

Przekładnia stanowi integralną część napędu a jej parametry, w równym co silnik stopniu, decydują o jakości napędu. Przekładnia w napędzie pełni funkcje:

- zamiany ruchu, zwykle z obrotowego na posuwisto-zwrotny,
- zmiany (zwykle redukcji) prędkości obrotowej silnika.

Od przekładni wymaga się:

- wytrzymałości,
- sztywności,
- minimalnego luzu zwrotnego,
- wysokiej sprawności.

### Wytrzymałość

Obciążenie przekładni wynika z prędkości obrotowej i momentu silnika oraz momentu obciążenia zewnętrznego. Przy doborze przekładni należy zwrócić uwagę na możliwe przeciążenia udarowe, częstotliwość załączeń oraz występowanie obciążeń nawrotnych. Szczególnie niebezpieczne mogą być wahania i drgania występujące przy obciążeniu znacznym momentem bezwładności.

### Sztywność i luz zwrotny

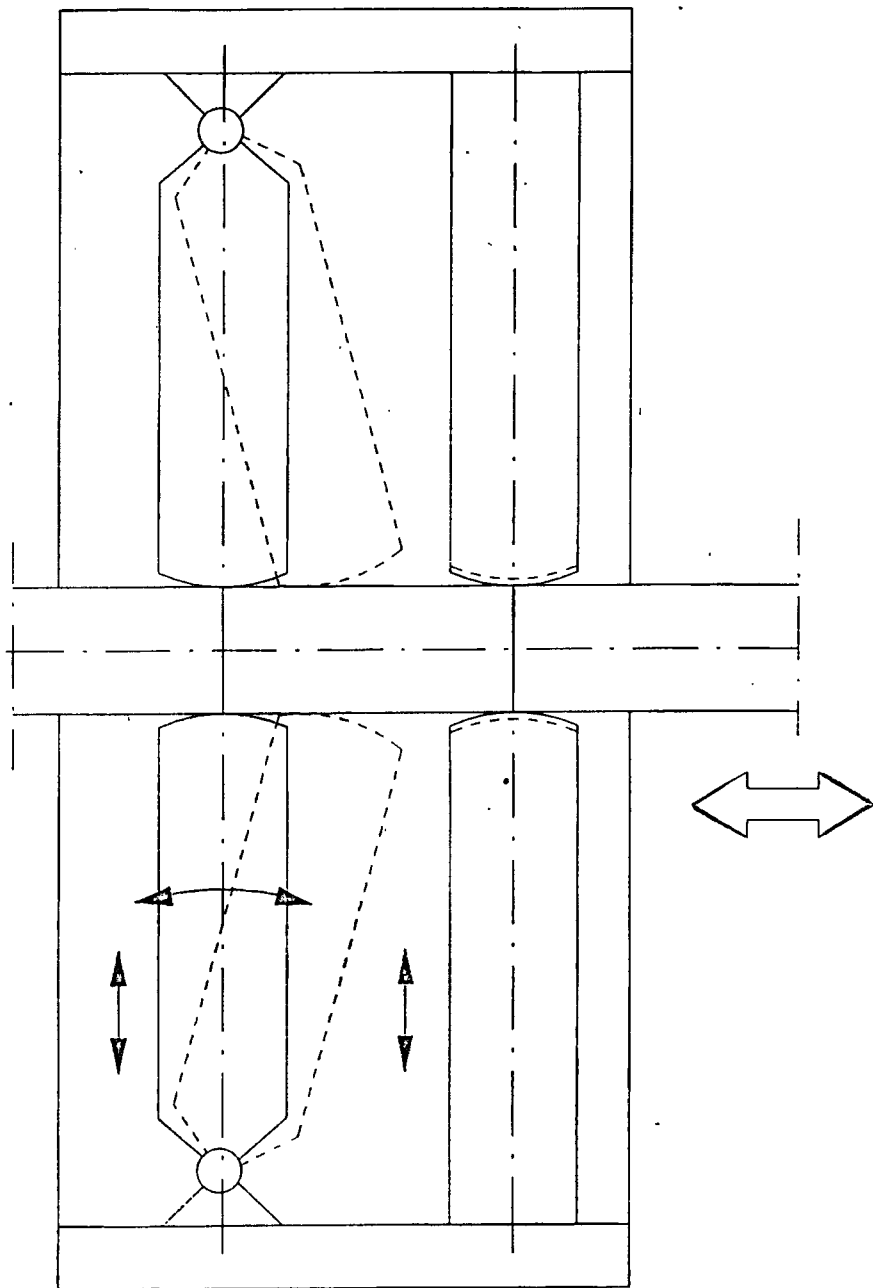
Sztywność przekładni wpływa na dokładność pozycjonowania manipulatora w przypadku obciążenia jej siłą czynną przy zatrzymanym napędzie, o ile manipulator nie jest wyposażony w zatrząsk pozycjonujący. W elastycznych systemach produkcyjnych możliwości stosowania takich zatrząsk są niestety ograniczone.

W innych przypadkach istotne znaczenie dla zachowania wymaganej powtarzalności manipulatora ma luz zwrotny lub histereza przekładni [3].

W manipulatorach najczęściej stosuje się następujące przekładnie mechaniczne:

- harmoniczne,
- planetarne,
- cykloidalne,
- śrubowe toczne,
- zębate paskowe.

W tablicy 6 przedstawiono podstawowe parametry tych przekładni.



Rys. 1. Zasada działania napędu piezoelektrycznego "bez końca"

Ostatnie lata przyniosły burzliwy wzrost zastosowań przekładni zębatych paskowych, będący wynikiem jej zalet, takich jak:

- zapewnienie powtarzalności  $\pm 0,1$  mm, wystarczającej przy pracach manipulacyjnych,
- trwałość i utrzymanie niezmiennych parametrów podczas długotrwałej eksploatacji (znaczną zaletą w stosunku do łańcuchów),
- cichobieżność,
- możliwość pracy z dużymi prędkościami i przy dużym obciążeniu,
- łatwość montażu,
- odporność na nieprzyjazne środowisko, zanieczyszczenie, wilgoć,
- niewielką masę,
- niewielką histerezę,
- ograniczone wymagania konserwacji.

Szczególnie chętnie stosuje się te przekładnie do napędu trawersów i innych urządzeń o dużym skoku. Wielu producentów oferuje je w zestawach z silnikami obrotowymi.

**Tablica 6.**

Zestaw podstawowych właściwości przekładni stosowanych w napędach manipulatorów

Typ przekładni	Podstawowe parametry
Harmoniczna	Luz zwrotny 30" Prędkość obr. do 4500 obr/min Moment do 4000 Nm Przełożenie 50 do 320
Planetarna	Luz zwrotny 3' Prędkość obr. do 5000 obr/min Moment do 5000 Nm Przełożenie 76 do 214
Śrubowa toczna	Skok 5 do 20 Nośność do 618 kN Sztwywność do 4 kN/ $\mu$ m
Zębata paskowa	Szerokość 6-400 mm Podziałka 0,08" do 1 1/4" Siła do 21 kN.
Cykloidalna	Luz zwrotny 3' Prędkość obr. do 6000 obr/min Moment do 6500 Nm Przełożenie 11 do 111



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Missala T., Biskup W., Bobiński W.: „Piezoelektryczny mikroprzetwornik wykonawczy dla robotów przemysłowych. Punkt kontr.1. - Rozpoznanie stanu techniki na świecie na podstawie literatury i opisów patentowych. Rozpoznanie dostępności potrzebnych materiałów. Opracowanie założeń do budowy modelu laboratoryjnego mikroprzetwornika.” PIAP, 1990. Spr. z pracy n.-b. nr arch. 6417.
- [2] Missala T.: „Optimum reduction gear ratio for servoactuators.” Tom: Intelligent Motion w: Mat. Konf. PCIM, VII 1993.
- [3] Oleksiuk M.: „Badanie przekładni falowych”. Biuletyn PIAP nr 4/91.
- [4] Oleksiuk M., Sołtyk T. i inni: „Opracowanie i uruchomienie produkcji uniwersalnego robota sześciokościowego o udźwigu 120/150 kg dużym obszarze pracy i dużych prędkościach. Etap 7a. Opracowanie koncepcji dwu wersji robota z napędami Boscha: wersji 120/150B, wersji super-szybkiej 120BS.” PIAP, Warszawa 1994. Spr. z pracy n.-b. nr arch. 7152.
- [5] Voigt K.: „Piezoaktuatorische Antriebe für den industriellen Einsatz”. Feinwerktechn. u. Messtech. 1995 nr 1/2 s. 68-72.