

Maciej Henzel

# Mechatroniczne układy wykonawcze

Warszawa 2010



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



fundusze unijne dla oświaty  
Program Edukacyjny

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Politechnika Warszawska  
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych  
Studia Podyplomowe dla Nauczycieli Przedmiotów Zawodowych  
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84, tel. 22 849 43 07, 22 234 83 48  
ipbmvr.simr.pw.edu.pl/spin/, e-mail: sto@simr.pw.edu.pl

Opiniodawca: dr inż. Krzysztof FALKOWSKI

Projekt okładki: Norbert SKUMIAŁ, Stefan TOMASZEK

Projekt układu graficznego tekstu: Grzegorz LINKIEWICZ

Skład tekstu: Janusz BONAROWSKI

Publikacja bezpłatna, przeznaczona dla słuchaczy Studiów Podyplomowych dla Nauczycieli Przedmiotów Zawodowych.

Copyright © 2010 Politechnika Warszawska

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ISBN 83-89703-38-6

Druk i oprawa: Drukarnia Expol P. Rybiński, J. Dąbek Spółka Jawna,  
87-800 Włocławek, ul. Brzeska 4

# Spis treści

<b>Wstęp .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Ogólna charakterystyka układów wykonawczych .....</b>	<b>7</b>
1.1. Rozwój układów wykonawczych.....	8
1.2. Definicje i pojęcia podstawowe .....	12
<b>2. Układy wykonawcze w urządzeniach i systemach mechatronicznych.....</b>	<b>17</b>
2.1. Elektryczny układ kierowniczy.....	18
2.2. Elektrohydrauliczny lotniczy układ wykonawczy .....	20
2.3. Silnik krokowy.....	24
2.4. Elektromechaniczny napęd liniowy.....	26
<b>3. Pneumatyczne układy wykonawcze .....</b>	<b>29</b>
3.1. Struktura pneumatycznych układów wykonawczych.....	30
3.2. Układy zasilające.....	32
3.3. Elementy i podzespoły .....	37
3.4. Cechy użytkowe .....	41
<b>4. Hydrauliczne układy wykonawcze .....</b>	<b>43</b>
4.1. Struktura hydraulicznych układów wykonawczych .....	44
4.2. Układy zasilające.....	47
4.3. Elementy i podzespoły .....	50
4.4. Cechy użytkowe .....	53
<b>5. Elektryczne układy wykonawcze.....</b>	<b>57</b>
5.1. Struktura hydraulicznych układów wykonawczych .....	58
5.2. Elementy i podzespoły.....	59
5.3. Cechy użytkowe .....	63

<b>6. Podsumowanie .....</b>	<b>65</b>
<b>7. Literatura.....</b>	<b>69</b>

# Wstęp

Niniejsze materiały zostały opracowane w ramach realizacji projektu pn. „STUDIA PODYPLOMOWE DLA NAUCZYCIELI PRZEDMIOTÓW ZAWODOWYCH - mechatronika pojazdów i maszyn, komputerowo wspomagane projektowanie i wytwarzanie, bezpieczeństwo człowieka w środowisku pracy i ergonomia” finansowanego ze środków UNII EUROPEJSKIEJ w ramach PROGRAMU OPERACYJNEGO – KAPITAŁ LUDZKI. Materiały przeznaczone są dla słuchaczy tych studiów kierunku „Mechatronika pojazdów i maszyn” prowadzonych na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Niniejsze opracowanie przygotowano dla przedmiotu pt. „Mechatroniczne układy wykonawcze”. Jego zawartość merytoryczna w pełni odpowiada zakresowi opisanemu w sylabusie opracowanym dla tego przedmiotu.

Materiały uzupełniające i aktualizujące do przedmiotu będą udostępniane studentom za pośrednictwem systemu e-learning.

Celem głównym przedmiotu będzie omówienie układów wykonawczych stosowanych w urządzeniach i systemach mechatronicznych, opis ich zasady działania oraz określenie obszarów wykorzystania w systemach mechatronicznych (pneumatycznych, hydraulicznych i elektrycznych). W tym celu opracowano następujące zagadnienia:

- podstawowe pojęcia, definicje, parametry i cechy użytkowe układów wykonawczych;
- przykłady układów wykonawczych w urządzeniach i systemach mechatronicznych;
- pneumatyczne, hydrauliczne i elektryczne układy wykonawcze – struktura, układy zasilające, elementy i podzespoły, cechy użytkowe.

Całość opracowanych materiałów dydaktycznych dla ww. przedmiotu obejmuje wstęp, 5 rozdziałów, podsumowanie oraz literaturę. W rozdziale 1 przedstawiono rozwój układów wykonawczych na przykładzie układów hydraulicznych oraz podstawowe pojęcia, definicje, parametry układów wykonawczych. W rozdziale 2 przedstawiono przykładowe rozwiązania konstrukcyjne układów wykonawczych stosowanych w urządzeniach i systemach mechatronicznych. W dalszych rozdziałach przedstawiono strukturę, elementy i opisano zasadę działania poszczególnych typów układów wykonawczych. I tak, w rozdziale 3 scharakteryzowano

pneumatyczne układy wykonawcze, w rozdziale 4 hydrauliczne układy wykonawcze, a w rozdziale 5 elektryczne układy wykonawcze. W podsumowaniu przedstawiono obecnie panujące tendencje w dziedzinie układów wykonawczych oraz zagadnienia związane z nowoczesnym oprogramowaniem do budowania i symulacji zjawisk fizycznych występujących w tego typu układach. Opracowanie to kończy się spisem literatury, która stanowi literaturę podstawową i uzupełniającą dla przedmiotu.

Zajęcia dydaktyczne w ramach tego przedmiotu prowadzone będą w formie wykładów z wykorzystaniem różnych typów i rozwiązań układów wykonawczych. Podczas tych zajęć studenci zostaną zapoznani również z zagadnieniami związanymi z projektowaniem układów wykonawczych z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania projektowego i symulacyjnego. Są to m.in. FluidSim Pneumatic, FluidSim Hydraulic, Altium Designer oraz AutoCad Electrical.

Podczas zajęć studenci otrzymają dodatkowe zadania do pisemnego opracowania, które umożliwią im zapoznanie się z danym typem oprogramowania oraz pozwolą na samodzielne wykonanie postawionych zadań projektowych. Opracowania te będą stanowiły uzupełnienie materiału przedstawionego podczas wykładów i będą udostępniane studentom za pośrednictwem systemu e-learning.

Zaliczenie przedmiotu będzie obejmować ocenę prac projektowych wykonanych przez studentów oraz egzamin z przedmiotu sprawdzający wiadomości teoretyczne.

# 1

## Ogólna charakterystyka układów wykonawczych

### W tym rozdziale

- Rozwój układów wykonawczych
- Definicje i pojęcia podstawowe

## 1.1. Rozwój układów wykonawczych

Układy wykonawcze są ważnym elementem systemów mechatronicznych, ponieważ w dużej części to od ich właściwości zależą parametry oraz cechy użytkowe tych systemów. Układy wykonawcze pełnią w większych systemach funkcję układów automatycznej regulacji o sygnale wyjściowym w postaci siły, momentu lub przemieszczenia. W literaturze stosowane są różne nazwy dla tego typu układów. Są to: aktuator (z angielskiego Actuator), aktor (z niemieckiego Aktor), układ wykonawczy (z rosyjskiego Исполнительный элемент). (Gosiewski, Osiecki & Panasiuk, 2007).

W niniejszym opracowaniu układy te jako elementy systemów mechatronicznych będą nazywane mechatronicznymi układami wykonawczymi lub układami wykonawczymi.

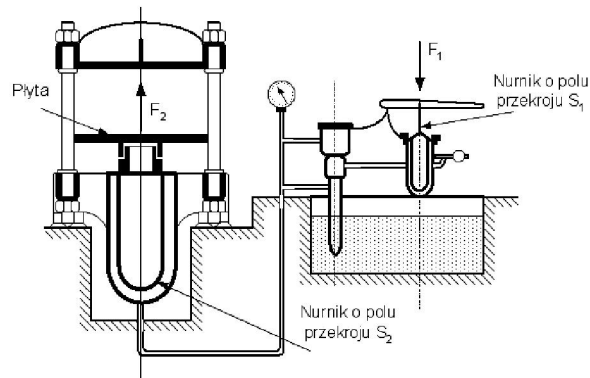
Przed przystąpieniem do omawiania cech i właściwości poszczególnych rodzajów układów przedstawiony zostanie ich rozwój, na przykładzie układów hydraulicznych.

Rozwój układów wykonawczych związany był z rozwojem teorii sterowania i układów automatycznej regulacji. Od XIX wieku następowały duże zmiany w tej dziedzinie. Początkowo wszelkiego rodzaju badania i zastosowania układów regulacji miały charakter empiryczny. I tak, w 1934 roku Hazen wprowadził pojęcie mechanizmu wykonawczego w układach sterowania położeniem. Przedstawił on m.in. projekt przekątnikowych mechanizmów wykonawczych mających zdolność ścisłego podążania za zmieniającym się sygnałem wejściowym. (Kowal, 2006)

Jednym z rodzajów układów wykonawczych są układy hydrauliczne, których pierwsze konstrukcje można odnaleźć już w starożytności. Około 260 r. p.n.e. Ktesibios skonstruował zegar wodny do odmierzenia czasu poprzez pomiar poziomu wody w naczyniu o stałym natężeniu przepływu. W rozwiązaniu tym stałość przepływu osiągnięto poprzez zastosowanie pływaka zanurzonego w cieczy, który otwierał lub zamykał otwór przelewowy w naczyniu. Jednak szerszy rozwój tego typu układów nastąpił dopiero w XVIII wieku, gdzie w Anglii podczas Rewolucji Przemysłowej zostało opatentowanych wiele zaworów prze-

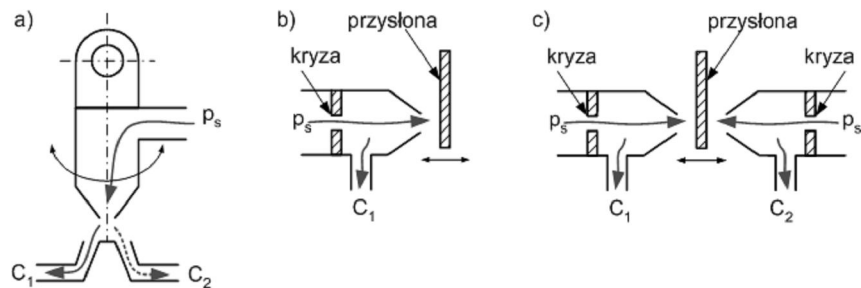


pływowych oraz urządzeń wspomagających sterowanie. Na przykład w 1795 roku Joseph Braham skonstruował prasę hydrauliczną (rysunek 1.1), w której cieczą roboczą była woda. Prasę tego typu stosowane były w Anglii w manufakturach przy napędach parowych.



Rysunek 1.1. Prasa hydrauliczna skonstruowana przez J. Brahama w 1795 roku

Kolejny znaczący rozwój układów hydraulicznych nastąpił w XIX wieku, kiedy jako ciecz roboczą zaczęto wykorzystywać olej mineralny. Dzięki temu Amerykanie Janney i Williams zastosowali w napędzie wieży artyleryjskiej okrętu liniowego wielotłoczkową hydrauliczną pompę osiową oraz przekładnię hydrostatyczną.



Rysunek 1.2. Rodzaje konstrukcji zaworów sterujących w układzie:  
a) z rurką strumieniową, b) dysza – przesłona o jednostronnym działaniu, c) dysza – przesłona o dwustronnym działaniu

Natomiast, przed II Wojną Światową firmy Askania Regulator Company i Askania Werke z Niemiec skonstruowały zawór sterujący oparty o zasadę ruchomej rurki strumieniowej (rysunek 1.2 a). W układzie tym strumień cieczy wypływający z ruchomej rurki strumieniowej jest odbierany przez dwie dysze zamieniające energię kinetyczną strugi na energię potencjalną – ciśnienie statyczne. Podobny zawór opracowała

## ROZDZIAŁ 1

firma Foxboro, która zastosowała rozwiązanie z ruchomą przesłoną zamykającą dyszę wylotową (rysunek 1.2 b, c).

Dalszy dynamiczny rozwój układów wykonawczych nastąpił podczas II Wojny Światowej, kiedy to opracowano wiele nowych technologii w zakresie stosowanych materiałów, jak również zaczęto wykorzystywać podzespoły elektroniczne.

W kolejnych latach opracowano m.in.:

- dwustopniowy zawór z cewką sterującą połączoną bezpośrednio z układem przemieszczenia tworząc w ten sposób pierwszy stopień wzmocnienia;
- dwustopniowy zawór w zamkniętym układzie sterowania w drugim stopniu wzmocnienia poprzez zastosowanie w pierwszym stopniu zwięzki sterującej drugim stopniem tworząc w ten sposób pośrednie połączenie mechaniczne.

W tym samym czasie firmy Dynamic Analysis i Control Laboratory of The Massachusetts Institute of Technology zastosowały w hydraulicznym układzie wykonawczym silnik momentowy, dzięki czemu poprawiono liniowość układu oraz polepszone jego wydajność siłową. Zastosowano tutaj m.in. indukcyjny czujnik przemieszczenia, jako źródło elektrycznego sygnału sprzężenia zwrotnego do sterowania drugim stopniem wzmocnienia. Zastosowanie takiego rodzaju sprzężenia, przy dużym wzmocnieniu, zredukowało wpływ sił tarcia w cewce pierwszego stopnia, a tym samym poprawiło charakterystykę statyczną zaworu.

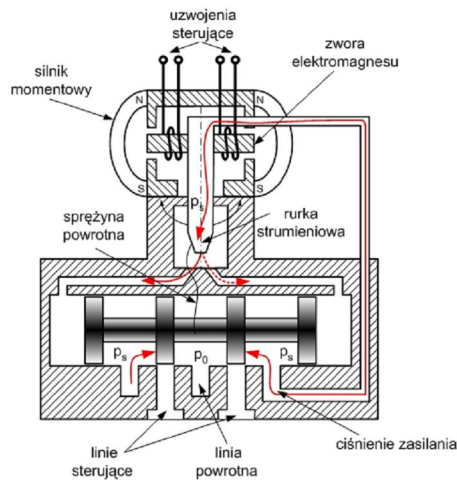
W 1957 roku R. Atchley opracował dwustopniowy serwozawór z pierwszym stopniem wzmocnienia typu rurka strumieniowa i drugim stopniem wzmocnienia typu suwakowego. Schemat ideowy takiego układu przedstawiono na rysunku 1.3.

Firma Bosch rozwijała m.in. układy wykonawcze z przetwornikiem sprzężenia zwrotnego wykorzystującym zjawisko Halla oraz z zintegrowanym modułem elektronicznym (rysunek 1.4). W 1974 roku firma Moog przedstawiła proporcjonalny zawór z potrójnym stopniem wzmocnienia z układem elektronicznym wypracowującym elektryczny sygnał sprzężenia zwrotnego.

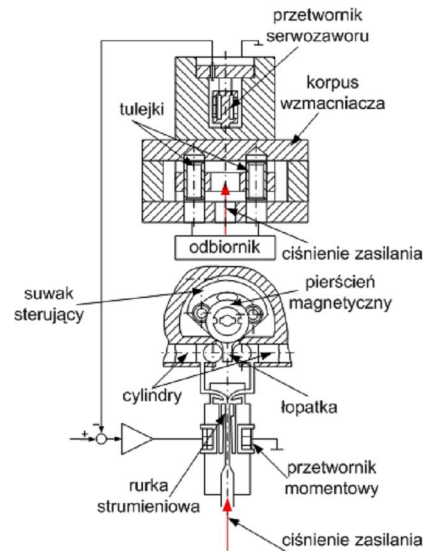
Podczas kolejnych prac nad układami hydraulicznymi powstały zintegrowane mechanizmy wykonawcze, które znalazły swoje zastosowanie m.in. w lotnictwie. Układy tego typu posiadają autonomiczny układ zasilania i przesyłu cieczy roboczej do układu wykonawczego, dlatego

## OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA UKŁADÓW WYKONAWCZYCH

nie wymagają rozbudowanych instalacji hydraulicznych. Dodatkowo zintegrowanie wszystkich elementów układu w jeden moduł spowodowało wzrost ich niezawodności działania.



Rysunek 1.3. Konstrukcja układu wykonawczego z dwustopniowym układem wzmocnienia



Rysunek 1.4. Serwowalwy firmy Bosch z modułem elektronicznym

Podczas kolejnych prac nad układami hydraulicznymi powstały zintegrowane mechanizmy wykonawcze, które znalazły swoje zastosowanie m.in. w lotnictwie. Układy tego typu posiadają autonomiczny układ

zasilania i przesyłu cieczy roboczej do układu wykonawczego, dlatego nie wymagają rozbudowanych instalacji hydraulicznych. Dodatkowo zintegrowanie wszystkich elementów układu w jeden moduł spowodowało wzrost ich niezawodności działania.

Obecnie prace nad układami wykonawczymi związane są głównie z wykorzystaniem w układach nowych materiałów, m.in. materiałów z pamięcią kształtu (ang. Smart Teory Alloy), materiałów magnetoreologicznych, nowych technologii związanych z układami cyfrowymi oraz nowymi, zintegrowanymi czujnikami pomiarowymi.

Innym kierunkiem rozwoju układów wykonawczych jest zaimplementowanie w ich układach sterowania nowych, bardziej zaawansowanych metod sterowania, które nie były wcześniej stosowane ze względu na ograniczenia technologiczne. Ograniczenia te związane były głównie z możliwościami obliczeniowymi sterowników cyfrowych. Jednak dynamiczny rozwój w tej dziedzinie spowodował, że sterowniki cyfrowe stały się układami o stosunkowo dużej mocy obliczeniowej zdolnej do realizacji złożonych algorytmów sterowania i znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie.

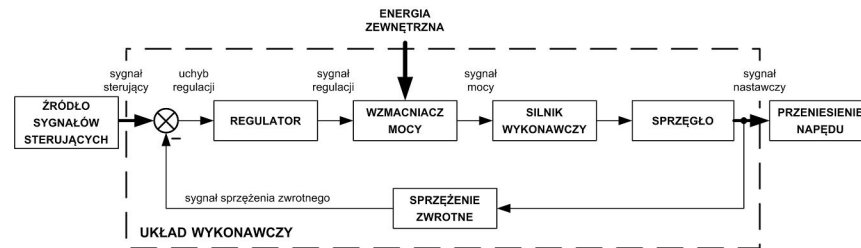
Stosowane obecnie nowe technologie mają na celu poprawienie właściwości statycznych i dynamicznych układów wykonawczych oraz ich niezawodności.

## **1.2. Definicje i pojęcia podstawowe**

Mechatronika rozumiana jako integracja maszyn, układów mechanicznych, elektronicznych, elektrycznych i oprogramowania komputerowego w celu otrzymania zaawansowanego i zautomatyzowanego, „inteligentnego” produktu (ang. „smart”) przystosowującego się do zmiennych warunków otoczenia. (Gosiewski, Osiecki, & Panasiuk, 2007)

Analizując powyższą definicję systemy mechatroniczne stanowią synergiczne połączenie elementów elektronicznych i mechanicznych w celu realizacji określonego zadania lub funkcji. Tak więc, mechatroniczny układ wykonawczy to układ, którego zadaniem jest przetworzenie wejściowej wielkości sterującej za pomocą przetworników elektronicznych

i mechanicznych w sygnał wyjściowy w postaci fizycznej – siły, przemieszczenia, momentu.



Rysunek 1.5. Struktura mechatronicznego układu wykonawczego

Na rysunku 1.5 przedstawiono strukturę mechatronicznego układu wykonawczego, który reaguje na zadany sygnał sterujący i wypracowuje sygnał nastawczy o odpowiednim rodzaju, kształcie oraz mocy. Najczęściej sygnał ten powoduje ruch elementu nastawczego całego systemu i oddziałuje na niego poprzez układ przeniesienia napędu.

W strukturze systemu mechatronicznego można wyróżnić źródło sygnałów sterujących, układ wykonawczy, układ przeniesienia napędu oraz sterujące sygnały oddziałujące na otoczenie lub inne systemy.

W analizowanej strukturze głównym elementem jest układ wykonawczy, który składa się z regulatora, wzmacniacza mocy, silnika, sprzęgła oraz pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Zgodnie z przyjętą definicją układu wykonawczego, zadany sygnał sterujący podany na jego wejście jest porównywany w sumatorze z sygnałem nastawczym poprzez kanał sprzężenia zwrotnego. Tak więc, jest to układ automatycznej regulacji, w którym uchyb regulacji dąży do zera. Sygnał uchybu przesyłany jest dalej do regulatora, z którego jako sygnał regulacji podawany jest na wejście wzmacniacza mocy. Sygnał ten jest najczęściej sygnałem elektrycznym lub cyfrowym małej mocy i wymaga wzmocnienia we wzmacniaczu mocy. Funkcję tę pełni zespół elektroniczny, elektro – hydrauliczny (elektro – pneumatyczny) lub hydrauliczny (pneumatyczny). Dla zrealizowania tego zadanie wymagane jest najczęściej dostarczenie do układu dodatkowej energii zewnętrznej. Tak wzmocniony sygnał sterujący podawany jest dalej na silnik, którego zadaniem jest przetworzenie sygnału wejściowego w wielkość fizyczną (np. przemieszczenie, obrót, siłę, moment). W zależności od rozwiązania może nim być silnik elektryczny, hydrauliczny lub pneumatyczny. Dalej, ruch ten zostaje sprzężony poprzez sprzęgło z układem przeniesienia napędu oraz pętlą sprzężenia zwrotnego. W tym przypadku sprzęgło

## ROZDZIAŁ 1

pełni rolę elementu zabezpieczającego układ wykonawczy od negatywnego oddziaływania innych układów występujących w torze sterowania, ogranicznika maksymalnych wartości momentu lub siły oraz elementu rozłączającego silnik od pozostałych układów w przypadku wystąpienia niesprawności.

Rodzaj stosowanego układu wykonawczego zależy od typu systemu mechatronicznego, jego przeznaczenia, warunków pracy oraz możliwości wytwarzania maksymalnych wartości sygnału nastawczego. Biorąc pod uwagę konstrukcję układów oraz czynnik roboczy, układy wykonawcze dzielimy na:

- elektromechaniczne;
- elektryczne;
- płynowe (hydrauliczne i pneumatyczne);
- mieszane (elektromechaniczne, elektropneumatyczne, elektrohydrauliczne);
- inne, np. piezoelektryczne.

Z punktu widzenia teorii sterowania mechatroniczny układ wykonawczy jest obiektem regulacji, na który oddziałują zarówno pożądane sygnały wejściowe (sygnały sterujące), jak również niepożądane sygnały wejściowe (sygnały zakłócające). Pod wpływem tych sygnałów układ wykonawczy wytwarza sygnały odpowiedzi, które nazywamy wyjściowymi sygnałami nastawczymi.

Sterowanie z zasady nie łączy się bezpośrednio z wydatkiem energii, lecz najczęściej jest wyrażone poprzez sygnał reprezentujący pewien strumień informacji, a jego efektem mogą być zmiany przepływu znacznych strumieni energii. Istnieją dwa zasadnicze sposoby sterowania:

- otwarte układy sterowania, w którym sygnał wyjściowy nie wpływa na akcję sterowania;
- zamknięte układy sterowania, w których stosuje się obwód sprzężenia zwrotnego oraz wyznacza się uchyb regulacji pomiędzy sygnałem sterującym, a sygnałem nastawczym.

W układach zamkniętych stosuje się sztywne, podatne lub izodromowe sprzężenie zwrotne.

## OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA UKŁADÓW WYKONAWCZYCH

Ważnym zagadnieniem w układach wykonawczych jest ich niezawodność, którą uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiednich układów redundancji sprzętowej i programowej.





# 2

## Układy wykonawcze w urządzeniach i systemach mechatronicznych

### W tym rozdziale

- Elektryczny układ kierowniczy
- Elektrohydrauliczny lotniczy układ wykonawczy
- Silnik krokowy
- Elektromechaniczny napęd liniowy

## 2.1. Elektryczny układ kierowniczy

Głównym zadaniem układu kierowniczego jest przetworzenie ruchu kierownicy przez kierowcę na odpowiednie wychylenie kół zgodnie z wolą kierowcy. Obecnie tego typu układy to systemy mechatroniczne, w których sygnał o ruchu kierownicy powoduje zadziałanie sprzężonego z nim układu wykonawczego, który poprzez moduł sterujący wysyła sygnały do układów wykonawczych zawieszenia pojazdu.

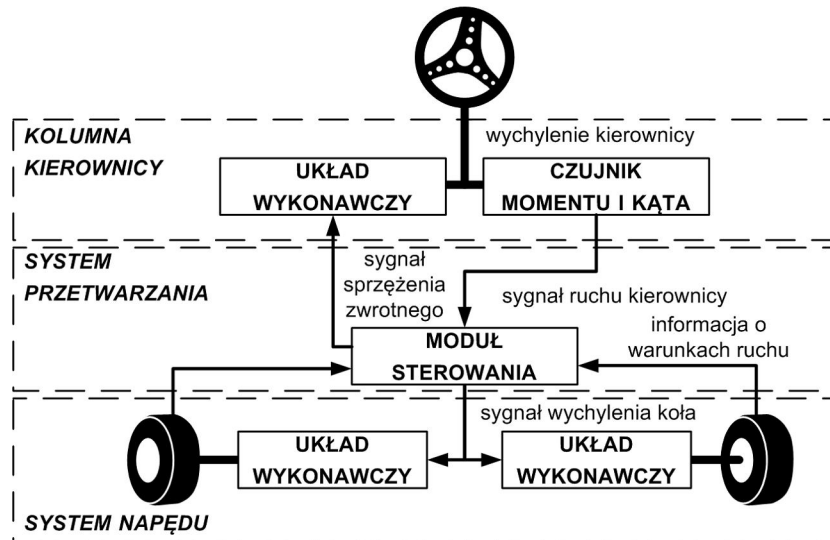
W nowoczesnych rozwiązaniach układy te są układami odwracalnymi, w których kierowca zwrótnie otrzymuje informację o warunkach ruchu.

Konwencjonalne układy wykonawcze posiadają mechaniczne połączenie pomiędzy kołem kierownicy, a kołami pojazdu. W przypadku elektrycznego układu kierowniczego połączenia takiego nie ma. Zabudowane w kolumnie kierowniczej i przy kołach pojazdu układy wykonawcze odbierają sygnały z modułu sterującego i odpowiednio skręcają koła. W przypadku elektrycznych układów sterowania takim elementem wykonawczym jest silnik elektryczny. Rozwiązanie takie posiada jednak wady. Układ taki przenosi dodatkowe drgania i zakłócenia od tego silnika oraz może wystąpić niewłaściwe i potencjalnie niebezpieczne przyspieszanie kierownicy przez silnik w chwili, gdy kierowca nagle zdejmie ręce z koła kierownicy. (Kuranowski & Mirska - Świętek, 2002)

W celu wyeliminowania tych wad w konstrukcji kolumny kierownicy stosuje się m.in. jeden lub dwa hamulce magnetoreologiczne ze sprzężoną. W omawianym rozwiązaniu mechatronicznego układu kierowniczego typu steer – by – wire (rysunek 2.1.) hamulce te sterowane są naprężeniami ścinającymi, czyli zmianą siły potrzebnej do przemieszczenia się względem siebie biegunów. W strukturze układu można wyróżnić: (Kuranowski & Mirska - Świętek, 2002):

- kolumnę kierowniczą, w której występują czujnik momentu i kąta oraz aktywny układ wykonawczy siły reakcji;
- system przetwarzania obejmujący moduł sterowania, który przetwarza informację z koła kierownicy oraz z zawieszenia przedniego;

- system napędu składający się z układów wykonawczych powodujących obrót kół zgodnie z sygnałami sterującymi.



Rysunek 2.1. Elektryczny układ kierowniczy

Taki, elektryczny układ kierowniczy wymaga zastosowania (Kuranowski & Mirska - Świętek, 2002):

- czujnika do określania kąta obrotu kierownicy oraz przekazywania wartości tego kąta do modułu sterującego;
- generatora referencyjnego momentu obrotowego, który generuje w czasie rzeczywistym odpowiedni referencyjny moment reakcji układu kierowniczego;
- elementu wykonawczego, który składa się z biernego elementu podatnego sprężyny i hamulca magneto reologicznego – generuje moment reakcji przekazywany do kierownicy.

Najważniejszym zagadnieniem w tym rozwiązaniu jest odpowiednie dobranie elementu wykonawczego zabudowanego w kolumnie kierownicy, ponieważ wpływa on na generowanie reakcji zwrotnej oraz na jakość działania całego układu kierowniczego. Może się zdarzyć, że gdy kierowca nagle zdjęmie ręce z koła kierownicy, silnik elektryczny kolumny może spowodować niewspółmiernie większy skręt kół kierowanych niż wynikałoby to z warunków ruchu. Aby tego uniknąć, ze względów bezpieczeństwa, stosuje się półaktywny układ wykonawczy, który

stanowi sprężyna z hamulcem magneto reologicznym. Rozwiązanie takie zapewnia poprawność działania układu kierowniczego niezależnie od zaniku sygnału sterującego od kierowcy. (Kuranowski & Mirska - Świętek, 2002)

Spotyka się konstrukcje elektrycznej kolumny kierowniczej z pół aktywnym układem wykonawczym lub z podwójnym pół aktywnym układem wykonawczym. W przypadku rozwiązania z pojedynczą sprężyną i hamulcem magneto reologicznym rozwiązanie takie nie pozwala na precyzyjne wytwarzanie zarówno dużych, jak i małych momentów oporu skrętnego. Wadę tę usunięto poprzez zastosowanie układu podwójnego.

Podsumowując zastosowany układ wykonawczy i zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne układu kierowniczego musi zapewnić bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów, a praca elektronicznego układu sterowania i elektrycznego skręcania kołami powinna być niezawodna.

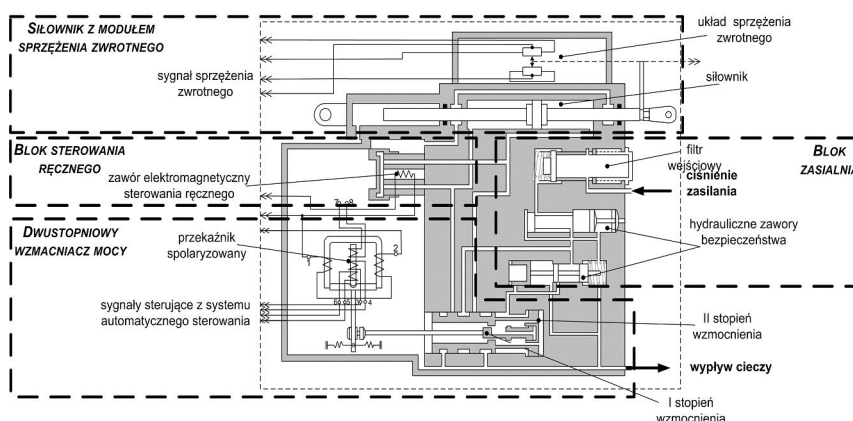
## **2.2. Elektrohydrauliczny lotniczy układ wykonawczy**

Na rysunku 2.2 przedstawiono lotniczy układ wykonawczy, który przeznaczony jest do mechanicznego przemieszczenia suwaka wzmacniacza hydraulicznego statecznika poziomego według sygnałów elektrycznych wypracowanych w bloku sterowania systemu automatycznego sterowania lotem.

W układzie tym wyróżnić można następujące elementy:

- blok zasilania obejmujący filtr wejściowy i zawór bezpieczeństwa;
- dwustopniowy wzmacniacz mocy z elektro – mechanicznym elementem sterującym zbudowanym na bazie przekaźnika spolaryzowanego;
- siłownik hydrauliczny dwustronnego działania z dwustronnym tłoczyskiem z modułem sprzężenia zwrotnego wraz z potencjometrycznym czujnikiem ruchu siłownika;

- blok sterowania ręcznego obejmujący zawór elektromagnetyczny sterowany ręcznie z kabiny pilota.



Rysunek 2.2. Schemat lotniczego układu wykonawczego

W układzie tym wyróżnić można następujące elementy:

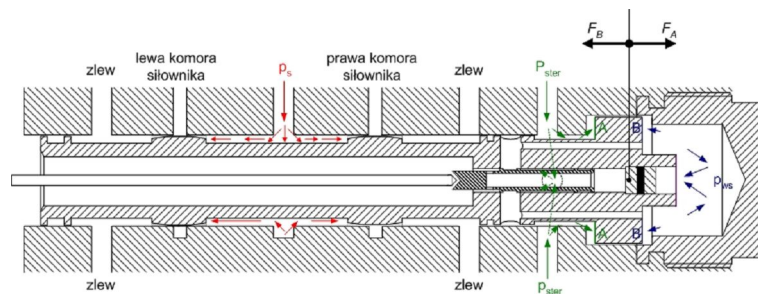
- blok zasilania obejmujący filtr wejściowy i zawór bezpieczeństwa;
- dwustopniowy wzmacniacz mocy z elektro – mechanicznym elementem sterującym zbudowanym na bazie przełącznika spolaryzowanego;
- siłownik hydrauliczny dwustronnego działania z dwustronnym tłoczyskiem z modułem sprzężenia zwrotnego wraz z potencjometrycznym czujnikiem ruchu siłownika;
- blok sterowania ręcznego obejmujący zawór elektromagnetyczny sterowany ręcznie z kabiny pilota.

Zasada działania układu wykonawczego jest następująca: przełącznik spolaryzowany otrzymuje z systemu automatycznego sterowania lotem elektryczne sygnały sterujące o różnej wartości i polaryzacji. Kiedy system automatycznego sterowania lotem jest włączony, to uzwojenie podmagnesowania przełącznika zasilane jest napięciem stałym. W zależności od sygnałów sterujących kotwica przełącznika przemieszcza się o odpowiednią wartość względem położenia neutralnego. Taki ruch kotwicy powoduje przemieszczenie suwaków rozdzielaczy I i II stopnia wzmocnienia. Przy przemieszczeniu w jedną lub drugą stronę od położenia neutralnego, rozdzielacz otwiera przepływ cieczy pod ciśnieniem do jednej z przestrzeni roboczych siłownika, łącząc jednocześnie drugą

przestrzeń z kanałem powrotnym. Po wyłączeniu automatycznych zakresów pracy systemu sterowania lotem, tłoczek siłownika mechanizmu wykonawczego można przemieszczać ręcznie za pomocą zaworu sterowania ręcznego łączącego obie przestrzenie robocze cylindra. Następuje to poprzez cykliczne podawanie przez pilota napięcia sterującego na ten zawór.

W układzie tym wykorzystany został dwustopniowy wzmacniacz hydrauliczny typu suwakowego, którego zasada działania jest następująca.

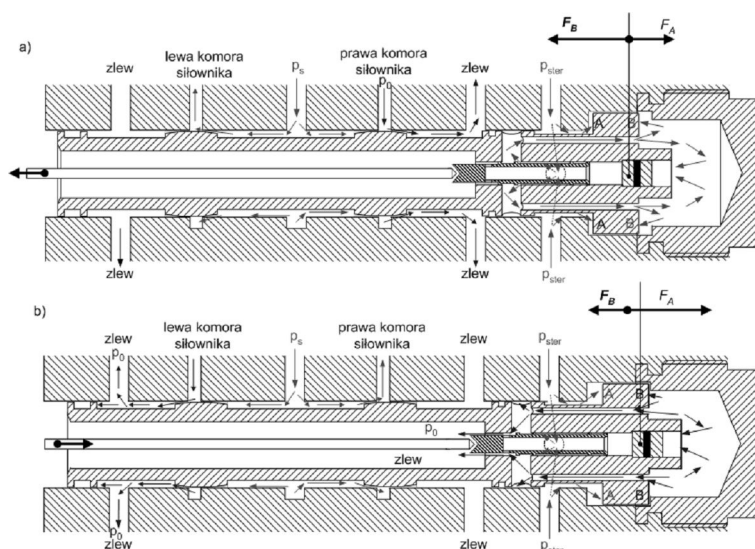
W położeniu neutralnym suwaka rozdzielacza II stopnia kanały zasilania komór siłownika są zasłonięte. Wówczas siły działające na suwak rozdzielacza są jednakowe, pomimo różnych powierzchni roboczych suwaka (rysunek 2.3).



Rysunek 2.3. Rozkład sił, natężeń przepływów, ciśnień oraz wzajemnego położenia elementów roboczych I- go i II- go stopnia wzmocnienia mechanizmu wykonawczego położeniu neutralnym.

Gdy tłoczek suwaka rozdzielacza I- go stopnia wzmocnienia zostanie przesunięty przez kotwicę przekaźnika w lewo, to rozptyw cieczy roboczej i przepływu sterującego będzie taki, jak na rysunku 2.4a. Ciśnienie sterujące  $p_{ster}$  będzie oddziaływać na powierzchnie robocze  $A$  i  $B$  suwaka rozdzielacza II stopnia. Ponieważ powierzchnia robocza  $B$  jest większa od powierzchni  $A$ , to siła działająca na suwak  $F_B$  spowoduje jego przemieszczenie w lewą stronę – układ będzie nadażał za ruchem suwaka I-go stopnia wzmocnienia. W tym samym momencie zostanie otwarty przepływ pomiędzy linią zasilającą o ciśnieniu  $p_s$  i lewą komorą siłownika – prawa komora siłownika zostanie połączona z linią zlew (powrotną). Spowoduje to ruch tłoka siłownika układu wykonawczego w prawo. Ten etap działania mechanizmu będzie trwał do momentu, gdy zamknięty zostanie przepływ pomiędzy suwakami rozdzielacza I i II stopnia wzmocnienia, a ich wzajemne położenie będzie takie, jak na rysunku 2.3. Wartość siły na powierzchni  $B$  zmaleje, a na powierzchni  $A$ , na

którą działa ciśnienie  $p_{ster}$ , będzie stałe. Siły  $F_A$  i  $F_B$  działające na suwak się zrównoważą.



Rysunek 2.4. Rozkład sił, natężeń przepływów, ciśnień oraz wzajemnego położenia elementów roboczych I- go i II- go stopnia wzmocnienia mechanizmu wykonawczego  
a) dla ruchu tłoka siłownika w prawo; b) dla ruchu tłoka siłownika w lewo

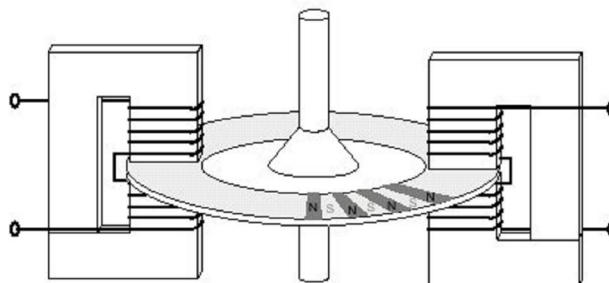
Ruch suwaka rozdzielacza II stopnia wzmocnienia w prawo względem położenia neutralnego realizowany jest analogicznie do ruchu w lewą stronę z tą różnicą, że suwak sterujący rozdzielacza I stopnia przesunięty zostanie w prawo. W wyniku tego, ciśnienie sterujące  $p_{ster}$  będzie oddziaływać na powierzchnię  $A$  suwaka rozdzielacza, a druga strona suwaka zostanie połączona z linią zlew (rysunek 2.4b). Ponieważ siła  $F_A$ , będzie większa od siły  $F_B$  działającej na suwak, nastąpi ruch suwaka w prawo – układ będzie nadszał za ruchem suwaka I-go stopnia wzmocnienia. W tym etapie pracy, po przejściu suwaka II stopnia wzmocnienia przez punkt równowagi (rysunek 2.3), nastąpi połączenie linii o ciśnieniu roboczym  $p_s$  z prawą komorą siłownika, natomiast lewa komora zostanie połączona z linią zlew. W wyniku tego nastąpi ruch tłoka siłownika układu wykonawczego w lewo. Ten etap działania mechanizmu wykonawczego będzie trwał do momentu, gdy zamknięty zostanie przepływ pomiędzy suwakami rozdzielacza I i II stopnia wzmocnienia i połączenie prawej strony suwaka rozdzielacza z linią zlew zostanie zamknięte. W wyniku tego ciśnienia wokół suwaka się zrównoważą.

## 2.3. Silnik krokowy

Silnik krokowy jest urządzeniem elektromechanicznym, które przekształca impulsy elektryczne w dyskretne ruchy mechaniczne. W układzie takim oś silnika obraca się o niewielkie przyrosty kąta pod wpływem impulsów elektrycznych.

Przykładem silnika krokowego jest silnik P630-258-B-00 firmy Portescap. W rozwiązaniu tym zastosowano wirnik z magnesami trwałymi, który ma kształt dysku (rysunek 2.5). Technologia wykorzystana w konstrukcji silnika pozwala na zoptymalizowanie obwodu magnetycznego i osiowe, wielobiegunowe magnesowanie dysku. Dzięki temu, porównaniu z tradycyjnymi silnikami krokowymi z magnesami trwałymi, silnik ten daje możliwość uzyskania większej ilości kroków na obrót oraz nie potrzebuje dodatkowej, metalowej struktury, aby zapewnić przepływ strumienia magnetycznego. Uzyskano w ten sposób bardzo niską bezwładność wirnika, co pozwala na skrócenie czasu od momentu podania zasilania do wykonania przez silnik pierwszego kroku.

Obwód magnetyczny tego silnika składa się z elementów w kształcie litery T zbudowanych z żelazowo – krzemowego laminatu. W przeciwieństwie do silników hybrydowych żelazne struktury o dużej objętości są zredukowane z zachowaniem swoich własności i jednoczesną eliminacją strat histerezowych oraz prądów wirowych. Dzięki temu wirnik może osiągać prędkość obrotową nawet do 10 000 kroków na sekundę, a małe straty w żelazie nie powodują znaczącego wzrostu temperatury.



Rysunek 2.5. Zasada działania silnika krokowego firmy Portescap

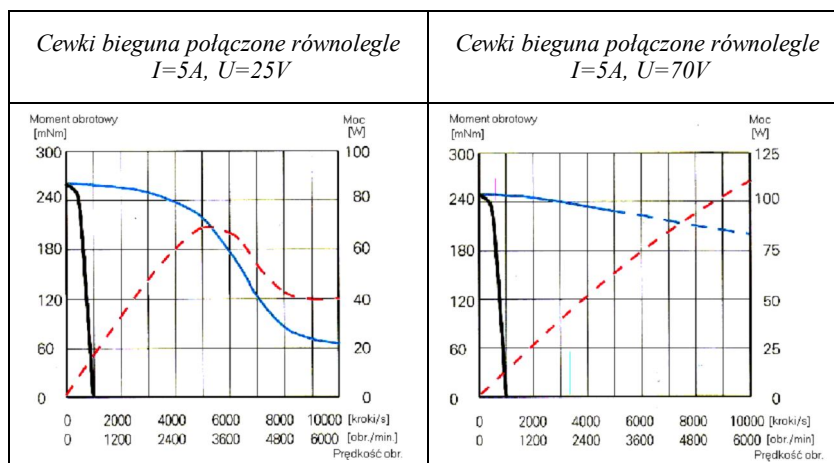
Chociaż obwód magnetyczny jest krótki, jest on tak wyliczony aby nie wchodził w zakres nasycenia przy dużym obciążeniu. Pozwala to na stosowanie małych silników, które mogą pracować w tych samych warunkach



kach co większe, produkowane w innej technologii. Jest to rezultatem wyższego stosunku momentu obrotowego do momentu bezwładności.

W konstrukcji tego silnika, w przeciwieństwie do innych silników krokowych tego typu, nie ma tu magnetycznego połączenia między fazami – każda faza jest całkowicie niezależna. W ten sposób jego geometria jest przystosowana do tego aby uzyskiwać prawdziwie sinusoidalną zależność między momentem obrotowym, a pozycją wirnika.

Tabela 2.1 Wybrane charakterystyki silnika P630-258-B-00



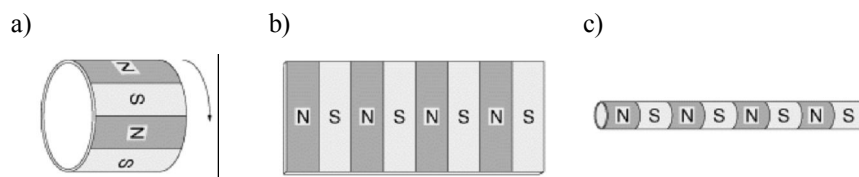
Opisany silnik krokowy P-630 współpracuje ze sterownikiem DM-224i, który w trybie mikrokrokowym oferuje zupełnie nową jakość sterowania jego ruchem. Rozwiązanie to umożliwia bezpośrednie, cyfrowe sterowanie silnikami połączonymi w sieć i znacznie obniża koszty takiego systemu. W tabeli 2.1 przedstawiono wybrane charakterystyki silnika P630-258-B, na których zaznaczono kolorem czarnym przebieg momentu synchronizującego, szarym – przebieg momentu maksymalnego, a linią przerywaną przebieg mocy wyjściowej.

Ogniwiem łączącym sterownik DM-224i ze środowiskiem komputera jest program APIimate, który zapewnia optymalne wykorzystanie parametrów układu i daje możliwość programowego sterowania ruchem silnika krokowego. Komunikacja komputera ze sterownikiem przebiega z wykorzystaniem szeregu komend, które w sposób jednoznaczny określają jego parametry ruchu.

## 2.4. Elektromechaniczny napęd liniowy

Silniki liniowe stosowane są w systemach automatyki przemysłowej od wielu lat. Jednym z najbardziej spektakularnych przykładów zastosowania takich silników są koleje magnetyczne, gdzie wykorzystuje się je do napędzania wagonów.

Zasada działania silników liniowych zbliżona jest do działania silników obrotowych. Silnik liniowy uzyskuje się przez rozwinięcie wirnika i stojanu silnika elektrycznego (rysunek 2.6). Zależnie od konstrukcji silniki tego typu dzielą się na płaskie, U-kanalowe i tubowe.



Rysunek 2.6. Kształty wirników: a) silnika klasycznego (wirującego); b) płaskiego (biegnik) c) silnik tubowy

W silniku płaskim biegnik (odpowiednik wirnika) jest płaską płytą poruszającą się pod statorem. W zależności od jego konstrukcji wyróżnia się silniki dwustronne, w których biegnik (płyta) porusza się między dwoma statorami lub jednostronne, w których występuje tylko jeden stator. W silnikach U-kanalowych biegnik porusza się w kanale utworzonym przez magnesy trwałe. Obecnie silniki takie stosowane są w konstrukcjach, gdzie wymagana jest bardzo duża precyzja ustawiania pozycji biegnika. Natomiast w silnikach tubowych wykorzystuje się biegnik w kształcie rury (rysunek 2.6c).

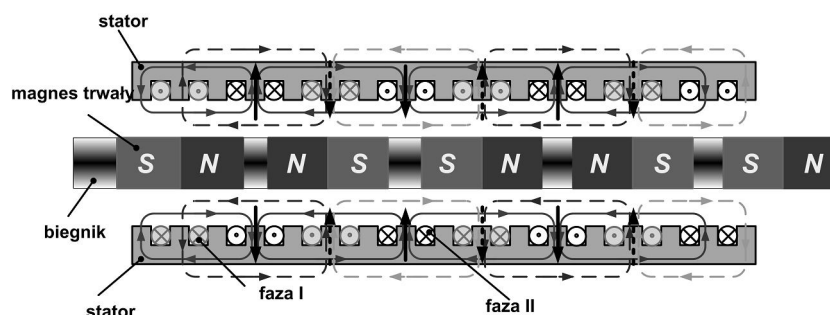
W napędach liniowych funkcja biegnika i statora jest zamienna – jeżeli jeden z elementów zostanie unieruchomiony (pełni funkcję statora) to drugi się porusza (pełni funkcję biegnika). Dlatego jednoznaczne zdefiniowanie biegnika i statora może być trudne.

Na szczególną uwagę zasługują konstrukcje napędów liniowych, w których nie wykorzystuje się obwodów magnetycznych tylko zjawisko oddziaływania silnego pola magnetycznego magnesów trwałych na cewki,

przez które płynie prąd elektryczny. Zaletą takich konstrukcji jest wyeliminowanie sił przyciągania między statorem i biegnikiem.

W silniku obrotowym wytwarzane jest wirujące pole magnetyczne, które oddziałując na wirnik powoduje powstanie momentu obrotowego. Zależnie od konstrukcji wirnika występują różne typy silników elektrycznych (indukcyjne, histerezowe, reluktancyjne, silniki z magnesami trwałymi, krokowe, itp.). W silnikach liniowych wykorzystuje się podobne zjawiska – pole wirujące zastąpione jest przez pole harmoniczne, którego wartość zmienia się na długości statora.

Przykładowo, w silniku liniowym dwufazowym znajdują się dwa uzwojenia przez które przepływa prąd (rysunek 2.7). W tak wykonanym napędzie składowa siła magnetomotorycznej przesuwa się pociągając wirnik z magnesami trwałymi. Natomiast w napędzie wykorzystującym zjawisko Lorentza pole magnetyczne magnesów generuje siłę, która oddziałuje na cewki z przepływającym prądem.



Rysunek 2.7. Zasada działania napędu liniowego

Napędy liniowe wykorzystywane są do generowania dużych sił liniowych, na przykład w pociągach magnetycznych. Dodatkowo rozwiązaniu takim z konstrukcji układu wykonawczego eliminuje się sprzęgła, przekładnie i inne źródła tarcia, a przez to podnosi walory eksploatacyjne, bezpieczeństwo i niezawodność układu.



# 3

## Pneumatyczne układy wykonawcze

### W tym rozdziale

- Struktura pneumatycznych układów wykonawczych
- Układy zasilające
- Elementy i podzespoły
- Cechy użytkowe

## 3.1. Struktura pneumatycznych układów wykonawczych

Powszechnie zastosowanie napędów pneumatycznych wynika z zalet czynnika roboczego, jakim jest powietrze. Należą do nich m.in. (Szenajch, 1997):

- brak przewodów powrotnych;
- powietrze jest bezpieczne i czyste w eksploatacji – nie grozi porażeniem, nie zanieczyszcza otoczenia;
- sprężone powietrze jest bardzo dobrym źródłem energii do wytwarzania sił w zakresie do kilkunastu kN;
- dostępność czynnika roboczego – powietrza stanowi atmosferę ziemską.

Natomiast, wadą powietrza jako czynnika roboczego jest jego duża ściśliwość, która utrudnia uzyskiwanie w napędach pneumatycznych wolnych i płynnych ruchów silnika.

Powietrze jest mieszaniną gazów otaczającą kulę ziemską, które charakteryzują ciśnienie  $p$ , temperatura  $T$  oraz objętość  $V$ . W układach pneumatycznych sprężone powietrze zamknięte jest w zbiorniku, na ściany którego wytwarza nacisk. Zmianę stanu gazu w zbiorniku wyraża się równaniem stanu gazu doskonałego (3.1). W zależności od warunków zmiany właściwości powietrza towarzyszyć mu będzie odpowiednia przemiana gazowa (tabela 3.1). (Olszewski, 2006)

$$\frac{p \cdot V}{T} = const \quad (3.1)$$

I tak, jeżeli objętość powietrza zostanie zmniejszona od wartości początkowej  $V_1$  do końcowej  $V_2$  z zachowaniem niezmięniętej temperatury, to ciśnienie wzrośnie od wartości  $p_1$  do  $p_2$ . Taka zmiana stanu powietrza nazywa się przemianą izotermiczną, w której zależność pomiędzy poszczególnymi parametrami wyraża prawo Boyle'a i Mariotte'a.

Tabela 3.1 Ilustracja przemian gazowych

Przemiana izotermiczna ( $T = const$ )	
	<i>Prawo Boyle'a – Mariotte'a</i> $p \cdot V = const$ lub $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$
Przemiana izobaryczna ( $p = const$ )	
	<i>Prawo Charlesa i pierwsze prawo Gay - Lussaca</i> $\frac{V}{T} = const$ lub $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Przemiana izochoryczna ( $V = const$ )	
	<i>Drugie prawo Gay - Lussaca</i> $\frac{p}{T} = const$ lub $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

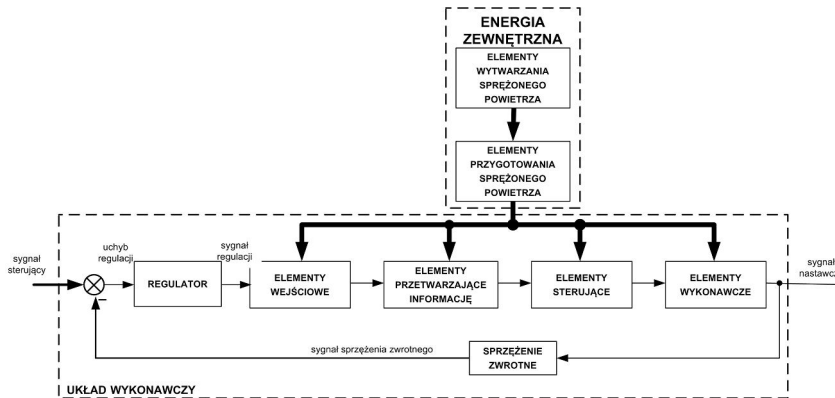
Ogrzewanie powietrza w zbiorniku, w wyniku czego wzrośnie temperatura od wartości początkowej  $T_1$  do końcowej  $T_2$ , przy zachowaniu stałej wartości ciśnienia spowoduje wzrost jego objętości. Taka zmiana stanu powietrza nazywana jest przemianą izobaryczną, którą charakteryzuje prawo Charlesa i Gay-Lussaca.

Natomiast wzrost temperatury powietrza od wartości początkowej  $T_1$  do końcowej  $T_2$ , przy niezmienniej objętości, powoduje wzrost ciśnienia proporcjonalny do wzrostu temperatury. Taka zmiana powietrza nazywa się przemianą izochoryczną, którą charakteryzuje prawo Gay-Lussaca.

W strukturze pneumatycznego, mechatronicznego układu wykonawczego (rysunek 3.1) można wyróżnić: (Nieżgoda & Pomierski, 1998)

- elementy wykonawcze – siłowniki i silniki pneumatyczne;
- elementy sterujące – zawory rozdzielające, zawory zwrotno – dławiące;

- elementy przetwarzające informację – zawory: logiczne rozdzielające, opóźniające, progowe, sekwencyjne, bloki pamięci, sterowniki pneumatyczne;
- elementy wejściowe – przyciski, wyłączniki progowe;
- elementy wytwarzania sprężonego powietrza – sprężarki, zbiorniki, osuszacze;
- elementy przygotowania sprężonego powietrza – filtry, reduktory, smarownice, elementy kontrolne.



Rysunek 3.1. Schemat strukturalny pneumatycznego układu wykonawczego

Tak zbudowany układ wykonawczy oddziałuje poprzez element przeniesienia napędu na obiekt sterowania.

## 3.2. Układy zasilające

Zgodnie z rysunkiem 3.1, aby zewnętrzna energia ciśnienia powietrza mogła zostać dostarczona do pneumatycznego układu wykonawczego musi zostać odpowiednio przetworzona w układach wytwarzania oraz przygotowania sprężonego powietrza.

Działanie elementu wytwarzającego sprężone powietrze polega na zasysaniu powietrza z otoczenia i jego sprężaniu. W wyniku tego uzyskamy powietrze z zanieczyszczeniami mechanicznymi w postaci pyłu, kurzu, rdzy, z wodą oraz olejem pochodzącym od układu smarowania sprężarki,



itp. Dlatego przed zastosowaniem sprężonego powietrza w napędach należy je oczyścić w zespole przygotowania powietrza, gdzie z powietrza usuwa się zanieczyszczenia, redukuje ciśnienie do wymaganego poziomu oraz wprowadza czynnik smarujący.

Oczyszczone powietrze powinno charakteryzować się:

- brakiem wody w postaci kropeł;
- zanieczyszczeniami mechanicznymi poniżej  $5\mu\text{m}$ , przy udziale wagowym  $0,7\text{ mg/m}^3$ ;
- niewystępowaniem olejów i innych cieczy w postaci kropeł.

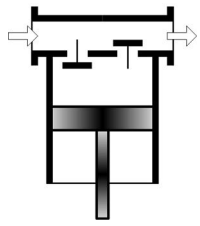
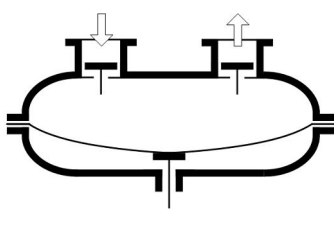
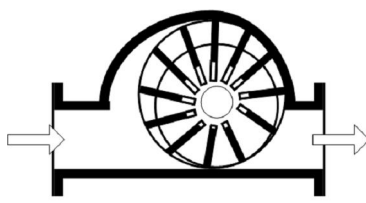
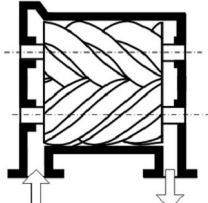
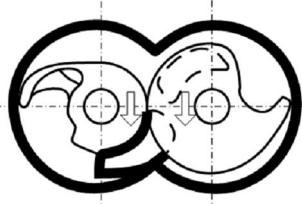
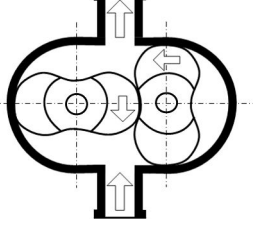
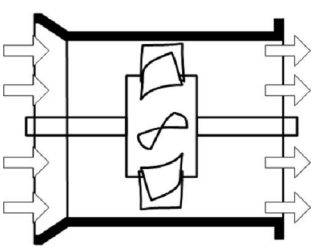
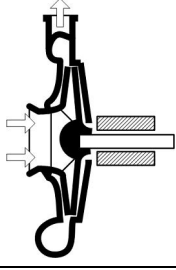
W tabeli 3.2 przedstawiono różne rodzaje sprężarek wykorzystywanych do wytworzenia powietrza. Są to sprężarki: (Schmid, Baumann, Kaufman, Paetzold, & Zippel, 2002)

- waporowe, które powodują zassanie powietrza do cylindra, zamknięcie, sprężenie i odprowadzenia do zbiornika;
- rotacyjne, które zasysają powietrze przez filtr i zawór ssawny, a podczas sprężania do komór sprężarki wtryskiwany jest olej, który jest następnie oddzielany od powietrza przed przekazaniem go do układu wykonawczego;
- przepływowe (turbinowe), które zasysają i rozpędzają powietrze atmosferyczne za pomocą kół z łopatkami lub za pomocą śmigła – kinetyczna energia strumienia przekształcana jest w energię potencjalną.

W zespole przygotowania sprężonego powietrza jest ono oczyszczane, zredukowane do wymaganego poziomu ciśnienia oraz uzupełniane czynnikiem smarnym (jeśli układy tego wymagają.) Tak więc w jego skład wchodzi filtr powietrza, zawór redukcyjny i smarownica.

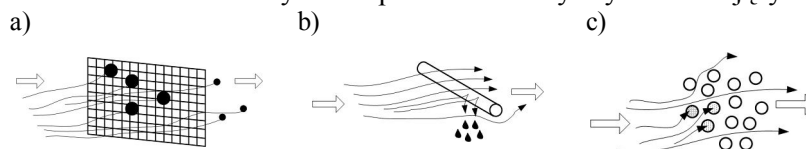
Tabela 3.2 Sprężarki powietrza

Sprężarki tłokowe waporowe	
<i>sprężarka tłokowa</i>	<i>sprężarka membranowa</i>

	
Sprężarki rotacyjne	
<i>sprężarka wielokomorowa</i>	<i>sprężarka śrubowa</i>
	
<i>sprężarka z obrotowym zębem</i>	<i>sprężarka Rootsa</i>
	
Sprężarki przepływowe (turbinowe)	
<i>sprężarka osiowa</i>	<i>sprężarka promieniowa</i>
	

Do usuwania pyłu i oleju ze sprężonego powietrza stosuje się:

- filtrowanie mechaniczne (rysunek 3.2a) polegające na przepuszczaniu powietrza przez sito, które zatrzymuje grubsze zanieczyszczenia i kondensuje olej;
- filtrowanie adsorpcyjne (rys.3.2b) polegające na kondensacji drobnych cząstek w większe i ich wydalaniu;
- filtrowanie przez absorpcję (rys.3.2c) polegające na pochłanianiu zanieczyszczeń przez chemiczny czynnik filtrujący.



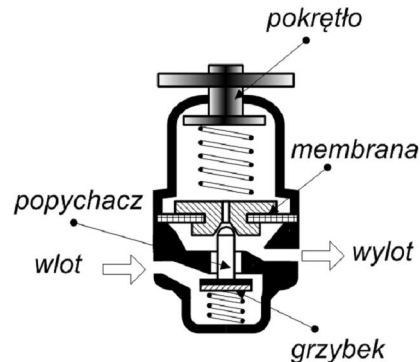
Rysunek 3.2. Sposób usuwania pyłu i oleju ze sprężonego powietrza  
a) mechaniczne; b) adsorpcyjne; c) absorpcyjne

Filtrowanie mechaniczne pozwala usunąć cząsteczki stałe o średnicy większej niż 5 mm, jednak w przypadku mniejszych cząsteczek stałych i oleju jest nieskuteczne. Cząsteczki stałe o średnicy 0,01 ÷ 0,5 mm oraz olej są usuwane w filtrach adsorpcyjnych. Filtr taki składa się z wielu cienkich włókien, pomiędzy którymi przestrzenie są względnie duże, a ich średnica jest bardzo mała. Cząsteczki stałe nie przenikają przez warstwę włókien, a cząsteczki oleju osadzają się na nich, łączą się w większe i dalej spływają wzdłuż włókien do zbiornika, gdzie są odciągane. Najbardziej skuteczną metodą usuwania zanieczyszczeń jest metoda absorpcji, która umożliwia prawie 100% oczyszczenie powietrza przy odpowiednim doborze chemicznego czynnika filtrującego. (Szenajch, 1997)

Kolejnymi elementami występującymi w układach przygotowania powietrza są zawory redukcyjne, które służą do zredukowania ciśnienia wejściowego do wartości wymaganej w układach wykonawczych. Ciśnienie to jest utrzymywane przez zawór na przyjętym poziomie, pomimo zmian ciśnienia wejściowego i natężenia przepływu powietrza przez ten zawór.

Działanie regulacyjne dokonuje się dzięki membranie, na którą z jednej strony działa ciśnienie robocze, z drugiej – działa siła sprężyny nastawiana za pomocą pokrętła (rysunek 3.3). Kiedy ciśnienie robocze pod grzybkim spadnie poniżej nastawionej przez pokrętło wartości, sprężyna naciskając w dół membranę poprzez popychacz odsuwa grzybek od gniazda umożliwiając przepływ powietrza. W sytuacji takiej ciśnienie w komorze pod membraną nie jest w stanie zrównoważyć sił

pochodzących od sprężyny nastawnej. Przez szczelinę przepływa powietrze do momentu, gdy nie osiągnie ponownie nastawionej wartości. Gdy ciśnienie na wyjściu osiągnie nastawioną wartość, wtedy membrana unosi się i grzybek przemyka lub całkowicie zamyka przepływ powietrza.



Rysunek 3.3. Schemat działania zaworu redukcyjnego

Wykonany w elemencie membrany otwór umożliwia obniżanie ciśnienia wyjściowego, gdy zawór redukcyjny zasila zbiornik. Natomiast, gdy nastawione ciśnienie zostanie obniżone wówczas membrana pod wpływem ciśnienia zostanie uniesiona do góry, co spowoduje wypływ powietrza ze zbiornika poprzez otwór w membranie do atmosfery. Taka sytuacja ma miejsce do chwili, kiedy ciśnienie w zbiorniku zrówna się z wartością ciśnienia nastawionego za pomocą pokrętła.

W pneumatycznych układach wykonawczych w celu zapewnienia ich smarowania stosuje się nasycanie sprężonego powietrza olejem. W tym celu wykorzystuje się smarownice smoczkowe lub selekcyjne.

Smarownice działają na zasadzie zwężki Venturiego. W wyniku zwężenia przekroju przewodu zwiększa się prędkość strumienia powietrza wskutek czego w strumieniu powstaje podciśnienie. W wyniku tego następuje zassanie oleju ze zbiornika do rurki rozpylacza, z której wycieka on do strumienia powietrza, gdzie zostaje rozpylony. W smarownicy smoczkowej na skutek różnicy ciśnień olej jest zasysany ze zbiornika przewodem i wkraplany rurką do zwężki. Natomiast w smarownicy selekcyjnej krople oleju nie wpadają bezpośrednio do kanału przepływowego smarownicy, lecz są porywane przez sprężone powietrze przepływające przez zbiornik. Dlatego tylko bardzo małe krople przedostają się do wypływającego powietrza, a większe opadają na dno zbiornika.

Zastosowanie smarownic sprężonego powietrza ma jednak swoje wady, którymi są:

- zanieczyszczenie powietrza w okolicy układu przygotowania powietrza szkodliwymi dla zdrowia zawiesinami oleju;
- zanieczyszczenie olejem przedmiotów podlegających obróbce oraz maszyn i urządzeń;
- szybkie zatykanie się tłumików hałasu wkręconych w kanały odpowietrzające zaworów rozdzielających.

Smarownice smoczkowe stosuje się w układach, w których odległość smarownicy od mechanizmu napędowego nie przekracza  $4 \div 5$  m, przy jednoczesnym istnieniu dużej liczby zagięć i rozgałęzień przewodów rozprowadzających sprężone powietrze. Natomiast mikrokrople ze smarownicy selekcyjnej są przenoszone przez sprężone powietrze na odległości do  $50 \div 60$  m. Stosowanie smarownic selekcyjnych zapewnia więc lepsze smarowanie mechanizmów napędowych, ale równocześnie zwiększa ilość oleju utrzymującą się w powietrzu w otoczeniu pracy układu pneumatycznego.

### **3.3. Elementy i podzespoły**

Do elementów i układów pneumatycznych zalicza się następujące grupy urządzeń:

- elementy sterujące przepływem i ciśnieniem powietrza;
- elementy i układy przetwarzające energię sprężonego powietrza na energię mechaniczną;
- elementy i układy do wprowadzania informacji i sygnalizacji stanów urządzeń.

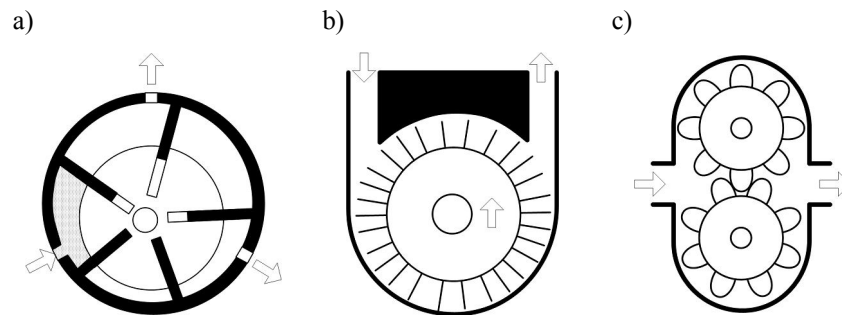
Do elementów sterujących kierunkiem przepływu powietrza zalicza się (Szenajch, 1997):

- zawory rozdzielające, które mają za zadanie doprowadzenie lub odprowadzenie powietrza w odpowiednim czasie do lub z określonych odbiorników;

- zawory zwrotne włączane do obwodu w celu zapewnienia przepływu powietrza tylko w jednym, określonym kierunku;
- zawory kolejności przepływu, których zadaniem jest zapewnienie odpowiedniej kolejności wypływu powietrza z jego kanałów wyjściowych.

Elementami i układami służącymi do zamiany energii sprężonego powietrza na energię mechaniczną są siłowniki i silniki nazywane napędami pneumatycznymi. Rozróżnia się napędy obrotowe o nieograniczonym zakresie obrotu (silniki pneumatyczne) i o ograniczonym zakresie obrotu (silniki o ruchu wahadłowym, siłowniki obrotowe) oraz napędy o ruchu posuwisto – zwrotnym (siłowniki liniowe). (Schmid, Baumann, Kaufman, Paetzold, & Zippel, 2002)

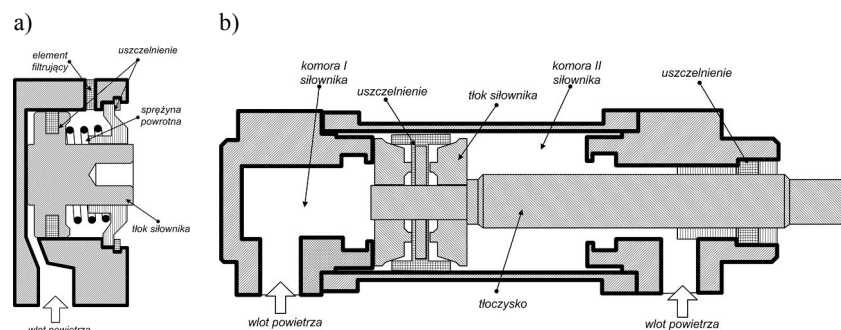
Najszerze zastosowanie znalazły w praktycznych aplikacjach silniki pneumatyczne łopatkowe, turbinowe i zębate (rysunek 3.4). Silniki pneumatyczne o ruchu obrotowym znalazły powszechne zastosowanie w napędach narzędzi pneumatycznych, takich jak wiertarki, klucze, wkrętarki.



Rysunek 3.4. Pneumatyczne silniki obrotowe  
a) łopatkowy; b) turbinowy; c) zębaty

W silniku łopatkowym wirnik z łopatkami jest zamocowany mimośrodowo względem obudowy. Łopatki mogą się przesuwać w wirniku i mają ciągły kontakt z obudową. W silniku tym, gdy przez otwór wlotu zostanie podłączone źródło sprężonego powietrza, a wylot zostanie podłączony do atmosfery, to koło łopatkowe napędzające wałek będzie obracało się w lewo. Natomiast w silniku zębatego znajdują się dwa koła zębate, z których jedno jest sprzęgnięte z napędzanym wałkiem, a drugie jest kołem współpracującym. Kierunek obrotów wałka zależy od kierunku przepływu sprężonego powietrza.

W siłowniku pneumatycznym energia mechaniczna jest wykorzystana do realizacji ruchów prostoliniowych (przesuwanie, podnoszenie, przestawianie) detali i narzędzi lub do wytwarzania sił dociskających lub sił uderzeniowych. Ze względu na sposób wywierania przez siłowniki siły dzielimy je na jednostronnego i dwustronnego działania (rysunek 3.5).



Rysunek 3.5. Schemat konstrukcyjny siłownika pneumatycznego  
a) jednostronnego działania; b) dwustronnego działania.

W siłowniku jednostronnego działania powietrze wpływa do jego wnętrza przez otwór przyłączeniowy do lewej (roboczej) komory siłownika i wywiera ciśnienie na tłok powodując ugięcie sprężyny powrotnej i jego przemieszczenie (rysunek 3.5a). Prawa komora siłownika jest zawsze połączona z atmosferą przez element filtrujący, który zabezpiecza siłownik przed przedostawaniem się do jego wnętrza zanieczyszczeń z atmosfery. Po połączeniu komory roboczej z atmosferą tłok wraca pod działaniem sprężyny do położenia wyjściowego.

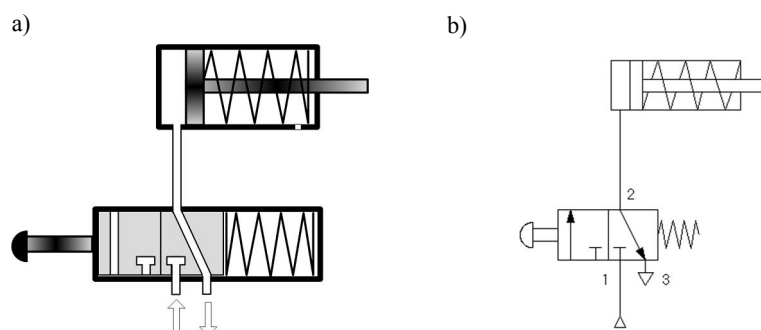
Większe zastosowanie mają siłowniki dwustronnego działania, które składają się z dwóch komór roboczych (lewej i prawej), zespołu tłoka z tłoczyskiem, cylindra i elementów uszczelniających (rysunek 3.5b). W siłowniku takim ciśnienie powietrza oddziałuje na tłok siłownika z dwóch stron. W zależności od sposobu podłączenia ciśnienia zasilania do siłownika następuje przemieszczenie tłoka z tłoczyskiem w lewą bądź prawą stronę. I tak, gdy do jednej komory podłączone jest ciśnienie zasilania, to druga komora podłączona jest do atmosfery. Dzięki temu, na tłoku siłownika powstaje różnica ciśnień powodująca jego przemieszczenie.

Innym kryterium podziału napędów pneumatycznych jest konstrukcja siłownika. Wówczas wyróżnia się siłowniki: tłokowe, nurnikowe, membranowe, mieszkowe, workowe i dętkowe.

Kolejną grupę elementów pneumatycznych stanowią elementy sterujące natężeniem przepływu powietrza, do których należą zawory dławiące zwykłe i proporcjonalne. Zwykłe zawory dławiące sterują przepływem powietrza w sposób ręczny, mechaniczny lub elektromechaniczny. Natomiast dławiące zawory proporcjonalne stosowane są do sterowania napędów mechanizmów, które wymagają dopasowania w sposób automatyczny wartości natężenia przepływu powietrza do zaprogramowanych prędkości ruchów. (Szenajch, 1997)

Z kolei, do elementów sterujących kierunkiem przepływu powietrza służą zawory rozdzielające, które mają za zadanie doprowadzenie lub odprowadzenie powietrza w odpowiednim czasie do lub z określonych odbiorników.

Na rysunku 3.6 przedstawiono układ sterowania siłownikiem jednostronnego działania za pomocą trzydrogowego zaworu dwupołożeniowego normalnie otwartego sterowanego ręcznie, przyciskiem.



Rysunek 3.6. Układ sterowania siłownikiem jednostronnego działania przez zawór rozdzielający trzydrogowy dwupołożeniowy:  
a) zasada działania; b) schemat

Jak wynika ze stosowanego nazewnictwa zaworów o ich typie decydują: liczba dróg przepływu, liczba sterowanych położań zaworu, rodzaj i odmiana sterowania oraz sposób zasilania.

Ostatnią grupę elementów sterujących stanowią elementy sterujące ciśnieniem powietrza, do których zalicza się zawory redukcyjne zwykłe i proporcjonalne.

Zawory redukcyjne zwykłe służą do zredukowania ciśnienia wejściowego do wartości roboczej i następnie do utrzymania tego ciśnienia na zadanym poziomie, pomimo zmian ciśnienia wejściowego i zmian natężenia przepływu przez ten zawór.



Natomiast, zadaniem zaworów redukcyjnych proporcjonalnych jest przekształcenie ciągłego sygnału wejściowego w ciągły proporcjonalny sygnał wyjściowy w postaci ciśnienia. W odróżnieniu od konwencjonalnego rozwiązania zaworów redukcyjnych, w których nastawianie wartości ciśnienia wyjściowego odbywa się ręcznie, w zaworach proporcjonalnych wartość ciśnienia wyjściowego nastawiana jest poprzez zmianę natężenia prądu zasilającego cewkę elektromagnesu proporcjonalnego.

## **3.4. Cechy użytkowe**

Napędy pneumatyczne są stosowane najczęściej do wytworzenia ruchu postępowego, rzadziej obrotowego. Tłoki siłowników osiągają prędkości obrotowe rzędu 150 obr/min oraz prędkości liniowe w zakresie od 0,5 m/s dla rozwiązań standardowych, do 30 m/s dla siłowników specjalnych. Siła wytwarzana w ruchu postępowym może wynosić do 30 kN. Elementy układów pneumatycznych generują małe momenty obrotowe, a sprawności napędów wynoszą około 80%. Sterowanie prędkością przepływu następuje poprzez elementy dławiące. Zakresy osiągniętych przesunięć liniowych wynoszą od kilku milimetrów do 1 metra, a dla siłowników beztłoczyskowych nawet do 5 metrów. Pneumatyczne układy wykonawcze mogą bez przeszkód pracować w atmosferach wybuchowych, są niezawodne i trwałe. Ich obsługa polega na okresowym sprawdzeniu elementów oczyszczających i oliwiających powietrze, usuwaniu uszkodzeń przewodów oraz nieszczelności. Układy pneumatyczne mogą pracować w warunkach zawilgocenia i nie są szkodliwe dla środowiska.



# 4

## Hydrauliczne układy wykonawcze

### W tym rozdziale

- Struktura hydraulicznych układów wykonawczych
- Układy zasilające
- Elementy i podzespoły układów
- Cechy użytkowe

## 4.1. Struktura hydraulicznych układów wykonawczych

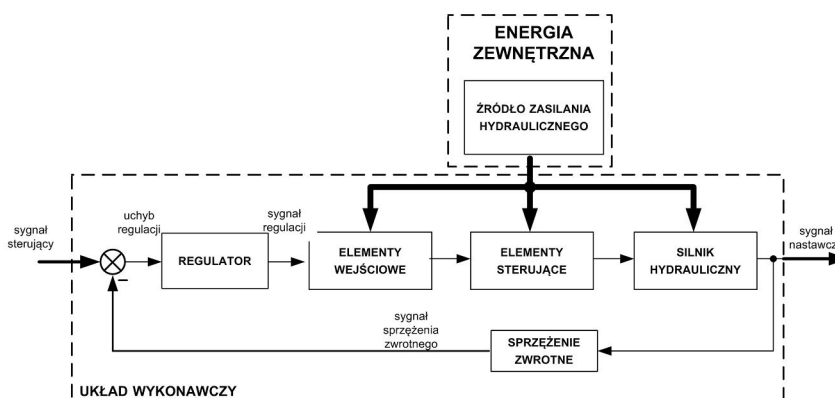
Kolejnym rodzajem układów płynowych są układy hydrauliczne, w których moc i sygnały sterujące przenoszone są za pomocą różnego rodzaju cieczy. Układy te ze względu na zasadę działania dzielimy na układy hydrostatyczne, których zasada działania polega na wykorzystaniu energii potencjalnej, czyli ciśnienia statycznego cieczy oraz układy hydrokinetyczne, których zasada działania polega na wykorzystaniu energii kinetycznej cieczy. (Pizoń, 1995)

Ogólnie moc maszyny hydraulicznej  $P$  (4.1) określa się jako iloczyn jej chłonności  $Q$  i przyrostu (spadku) ciśnienia strumienia cieczy  $\Delta p$  przepływającej przez maszynę. Tak więc, w układach hydrostatycznych przeniesienie energii odbywa się przez energię ciśnienia cieczy, a natężenie przepływu jest małe. Natomiast w układach hydrokinetycznych przeniesienie energii odbywa się poprzez duże natężenia przepływu cieczy, a ciśnienie pracy jest małe.

$$P = Q \cdot \Delta p \quad (4.1)$$

Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat ideowy najprostszego układu hydraulicznego, który składa się ze źródła zasilania hydraulicznego, elementów wejściowych i sterujących oraz odbiorników. W układzie tym występuje również pętla sprzężenia zwrotnego, którego zadaniem jest przeniesienie sygnału wyjściowego z układu na jego wejście. Podobnie jak w układach pneumatycznych również w układach hydraulicznych sygnał nastawczy jest dalej przetwarzany w układzie przeniesienia napędu.

Źródło zasilania hydraulicznego może być sterowane za pomocą sygnałów mechanicznych, elektrycznych, pneumatycznych lub hydraulicznych, np. można zmienićysterowanie pompy o zmiennym wydatku, aby zmienić natężenie przepływu, a tym samym prędkość silnika.



Rysunek 4.1. Struktura układu hydraulicznego

Jako układy napędowe, sterowania i regulacji większe zastosowanie uzyskały układy hydrostatyczne, które posiadają następujące zalety:

- możliwość rozwijania dużych mocy przy stosunkowo małych wymiarach i małej masie odbiorników hydraulicznych;
- dobre właściwości dynamiczne spowodowane małą wartością momentu bezwładności obracających się elementów silnika hydraulicznego;
- możliwość ciągłego, płynnego nastawiania;
- dobre odprowadzanie ciepła przez ciecz roboczą;
- naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem.

O parametrach układu hydraulicznego w dużym stopniu decydują właściwości, rodzaj cieczy roboczej oraz jej sposób przepływu. Przepływ ten w układach hydraulicznych może być:

- laminarny (uwarstwiony), w którym sąsiadujące ze sobą cząsteczki cieczy przemieszczają się po torach równoległych – można wówczas wyodrębnić warstewki cieczy między którymi nie zachodzi wymiana cieczy;
- turbulentny (burzliwy), w którym ruch cząsteczek cieczy jest nieuporządkowany zarówno w kierunkach równoległych, jak i prostopadłych.

Pomiędzy tymi podstawowymi rodzajami przepływów występuje warstwa przejściowa, która charakteryzuje się brakiem stabilności zjawisk.

## ROZDZIAŁ 4

Strefa ta występuje w pobliżu krytycznej liczby Reynoldsa i jest tym szersza im większa jest lepkość przepływającej cieczy.

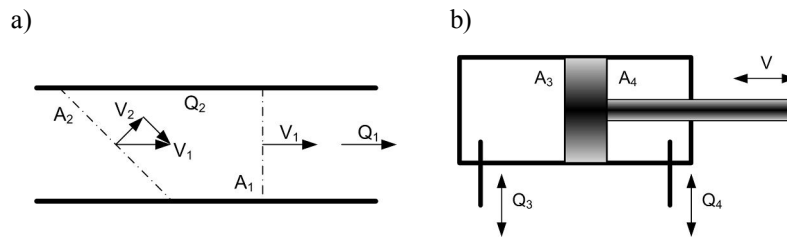
Do podstawowych wielkości fizycznych charakteryzujących układ hydrauliczny, należy ciśnienie cieczy roboczej  $p$ , które definiowane jest jako siła  $F$  odniesiona do efektywnej powierzchni  $A$  i wyrażone zależnością (4.2).

$$p = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

Drugą ważną wielkością jest objętościowe natężenia przepływu  $Q$  (strumień objętości), które wyrażone jest zależnością (4.3).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.3)$$

gdzie:  $V$  – objętość płynu przepływającego z prędkością  $v$  przez powierzchnię  $A$ ;  $t$  – czas przepływu cieczy.



Rysunek 4.2 Schemat przepływu cieczy roboczej w przewodzie.  
(Mednis, 1999)

Na rysunku 4.2 przedstawiono szkic przepływu cieczy w przewodzie hydraulicznym.

Często w zespołach hydraulicznych, np. w siłowniku (rysunek 4.2b) natężenie przepływu wiąże się z prędkością przemieszczania odpowiedniej powierzchni. Dla tłoka poruszającego się z prędkością  $v$  w przybliżeniu obowiązują zależności:

$$Q_3 = vA_3 \quad \text{lub} \quad Q_4 = vA_4 \quad (4.4)$$

Zatem zassanie do lub z cylindra odpowiedniego natężenia przepływu cieczy wywołuje określoną prędkość lub odwrotnie: ruch tłoka z określoną prędkością powoduje zassanie z lub do cylindra odpowiedniego natężenia przepływu. Ponadto, ponieważ  $Q_3/A_3 = Q_4/A_4$ , a przy różnych

powierzchniach –  $A_3 \neq A_4$ , przepływy będą również różne –  $Q_3 \neq Q_4$ . Oznacza to, że siłownik z jednostronnym tłoczyskiem podczas wysuwu „gromadzi”, a przy wsuwie „oddaje” do układu pewną objętość cieczy wynikającą z różnych powierzchni czynnych tłoka.

W układach hydraulicznych nośnikiem energii ciśnienia są ciecze hydrauliczne, które muszą spełniać wiele kryteriów, np. duża trwałość i odporność chemiczna na działanie ciśnienia, temperatury i utleniania, dobre właściwości smarne, małą ściśliwością i rozszerzalnością cieplną. Wykorzystuje się tutaj głównie oleje mineralne, ciecze trudnopalne oraz oleje roślinne.

Oleje mineralne uzyskiwane z destylacji i rafinacji ropy naftowej (tzw. olej bazowy) charakteryzuje się niskimi wskaźnikami jakościowymi. Dlatego do takiego oleju stosuje się dodatki uszlachetniające zwiększające jego właściwości i jakość w celu jego wykorzystania w praktyce. Rozróżnia się m.in. oleje zawierające dodatki antyutleniające i chroniące przed korozją (symbol oleju – HL), dodatki detergująco – dyspergujące oraz polepszające smarność (symbol oleju – HM), dodatki zwiększające lepkość (symbol oleju – HV) oraz inne.

Ciecze trudnopalne o symbolu HF stosowane są w miejscach, gdzie występuje niebezpieczeństwo powstania pożaru, konieczność ochrony środowiska naturalnego lub gdy możliwy jest jego kontakt z otwartym płomieniem.

W układach hydraulicznych stosowane są również oleje roślinne ze względu na ich całkowitą nietoksyczność i bardzo dobrą zdolność biodegradacji. Najbardziej rozpowszechnionym przykładem takiego zastosowania jest wykorzystanie oleju rzepakowego, który po modyfikacji wykazuje się lepkością porównywalną z olejem mineralnym, właściwościami smarnymi lepszymi od oleju mineralnego i dobrą współpracą z metalami (nie wykazuje agresywności wobec nich).

Innymi parametrami opisującymi właściwości cieczy hydraulicznej są gęstość, ściśliwość, moduł sprężystości objętościowej.

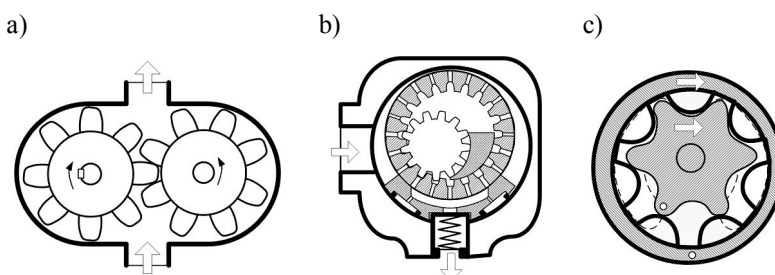
## **4.2. Układy zasilające**

Źródłem energii w układach hydraulicznych są różnego rodzaju pompy, które zamieniają energię mechaniczną silnika napędowego na energię

hydrauliczną strumienia cieczy roboczej. Hydrauliczna stacja zasilająca składa się z pompy wyporowej, silnika napędzającego pompę (najczęściej elektrycznego), zbiornika oleju, filtra olejowego oraz zaworu przelewowego lub zaworu bezpieczeństwa. Ponadto układ hydrauliczny może być zasilany ze źródła stałego ciśnienia, którego rolę pełni akumulator hydrauliczny. (Pizoń, 1995)

W układzie hydraulicznym pompa powinna wytworzyć wymagane ciśnienie i natężenie przepływu. W tym przypadku parametr ciśnienia zależy od rodzaju zewnętrznego obciążenia odbiornika. Natomiast natężenie przepływu zależy od jej typu i parametrów konstrukcyjnych. W układach hydraulicznych stosuje się pompy zębate, śrubowe, łopatkowe i tłokowe.

Najbardziej rozpowszechnionym rodzajem pomp są pompy zębate, które charakteryzują się prostą i zwartą konstrukcją (rysunek 4.3).



Rysunek 4.3. Schemat działania hydraulicznych pomp zębatych  
a) o zazębieniu zewnętrznym; b) o zazębieniu wewnętrznym;  
c) gerotorowej.

Pompa zębata o zazębieniu zewnętrznym (rysunek 4.3a) składa się z pary kół zębanych, z których jedno jest napędzane. Podczas obracania kół ciecz hydrauliczna jest przenoszona wrębami międzyzębnymi wzdłuż ściany obudowy ze strony ssawnej na stronę tłoczną. Zęby będące w zazębieniu nie pozwalają na wsteczny przepływ, odcinają przestrzeń wrębów od otoczenia wcześniej, zanim z nich wypłyną resztki cieczy. Następuje wówczas sprężanie tych resztek, co wywołuje „twardy”, hałaśliwy bieg pompy. (Schmid, Baumann, Kaufman, Paetzold, & Zippel, 2002)

W pompach zębatych o zazębieniu wewnętrznym zębnik napędza koło o zazębieniu wewnętrznym (rysunek 4.3b) trzymane przez wkładkę sierpową i panewkę łożyska. Ciecz przepływa we wrębach między zębnikiem, a wkładką sierpową lub pomiędzy wymienioną wkładką, a kołem o wewnętrznym zazębieniu. (Schmid, Baumann, Kaufman, Paetzold, & Zippel, 2002)



Trzecim rodzajem pompy hydraulicznej jest pompa gerotorowa (rysunek 4.3c), która składa się z obudowy, nieosiowo ustawionego uzębionego zewnętrznie wirnika i wieńca uzębionego wewnętrznie. Oba elementy są półkuliście zazębione i mają niejednakową liczbę zębów. Podczas jednego obrotu w prawym obszarze pompy powstaje pusta przestrzeń, do której przez nerkowaty kanał wpływa ciecz hydrauliczna, a w lewym obszarze następuje zmniejszenie tej przestrzeni i ciecz jest przetłaczana do odpowiedniego kanału tłocznego. (Schmid, Baumann, Kaufman, Paetzold, & Zippel, 2002)

Kolejnym rodzajem pomp są pompy śrubowe, które stosuje się w układach o niskich ciśnieniach i dużej wydajności. Zasada działania tych pomp jest analogiczna jak pneumatycznych pomp śrubowych. Pompy te wyposażone są w obracające się wirniki o zębach śrubowych, które działają podobnie jak koła zębate o skośnych zębach. Dzięki wzajemnie przesuwającym się bokom śrub, które mają uszczelniające kształty, ciecz nie może przepływać wstecz.

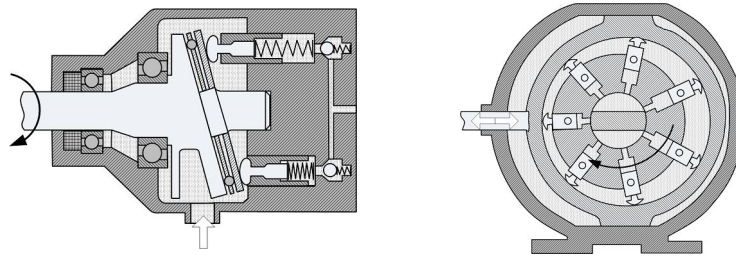
Dużą grupę pomp hydraulicznych stanowią pompy tłokowe, które wykorzystuje się w układach hydraulicznych średnio i wysokociśnieniowych. Ze względu na ułożenie tłoków w stosunku do osi wałka napędowego rozróżnia się pompy tłokowe osiowe (o wychylnej tarczy lub wychylnym wirniku) i promieniowe (rysunek 4.4). W pompach osiowych tłoki poruszają się równoległe do osi obrotów lub są odchylone od niej o kąt  $40^\circ$ . Natomiast tłoki pompy promieniowej ułożone są prostopadle do osi obrotów.

Drugim rodzajem źródła zasilania w układach hydraulicznych są akumulatory hydrauliczne, których zadaniem jest gromadzenie cieczy pod ciśnieniem przy braku lub zmniejszonym zapotrzebowaniu odbiornika i oddawanie jej w razie zwiększonego zapotrzebowania.

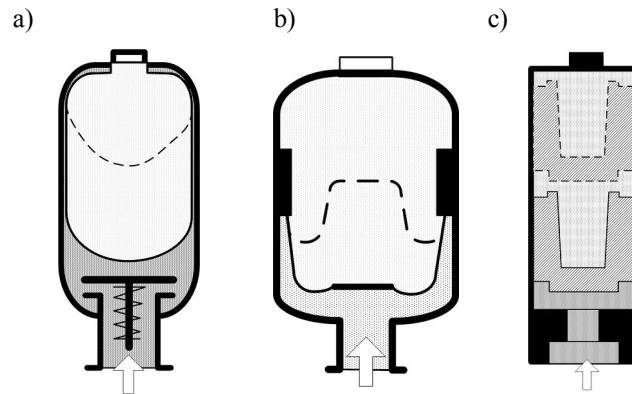
Zastosowanie akumulatora hydraulicznego pozwala na dobór pompy o mniejszej wydajności, ponieważ w okresach postoju silnika hydraulicznego następuje ładowanie akumulatora cieczą pod ciśnieniem, natomiast w okresach pracy silnika hydraulicznego akumulator rozładowuje się i uzupełnia zapotrzebowanie na zwiększone natężenie przepływu w układzie hydraulicznym. Istnieją trzy główne typy akumulatorów: ciężarowe, sprężynowe i gazowe. (Pizoń, 1995)

a)

b)



Rysunek 4.4. Schemat działania tłokowych pomp hydraulicznych  
a) osiowej; b) promieniowej.

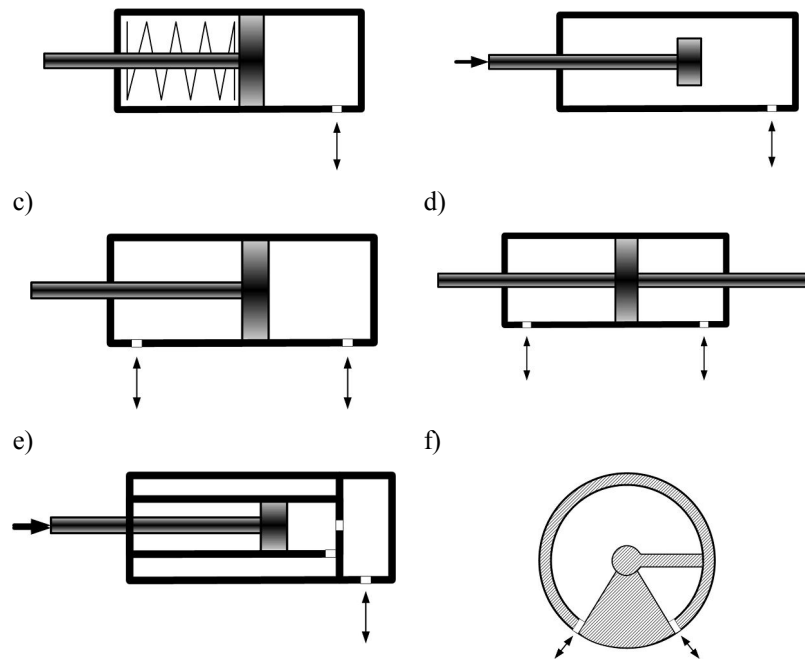


Rysunek 4.5. Schemat działania akumulatora hydraulicznego  
a) pęcherzowego; b) membranowego; c) tłokowego.

## 4.3. Elementy i podzespoły układów

Kończym elementem układu hydraulicznego są napędy hydrauliczne, do których zalicza się siłowniki o ruchu wahadłowym (liniowym) i silniki hydrauliczne.

a) b)



Rysunek 4.6. Schemat działania siłowników hydraulicznych:  
 a) tłokowy jednostronnego działania ze sprężyną; b) nurnikowy;  
 c) tłokowy dwustronnego działania z jednostronnym tłoczyskiem; d)  
 tłokowy dwustronnego działania z dwustronnym tłoczyskiem; e)  
 teleskopowy; f) wahliwy z tłokiem obrotowym.

Zadaniem siłowników hydraulicznych jest nadawanie ruchu postępowego zespołom maszyn technologicznych z jednoczesnym przenoszeniem sił. Parametrami użytkowymi siłowników są chłonność siłownika i maksymalna siła przez niego rozwijana.

Wyróżnia się następujące rodzaje siłowników hydraulicznych (rysunek 4.6):

- siłownik nurnikowy (siłownik jednostronnego działania);
- siłownik jednostronnego lub dwustronnego działania;
- siłownik z jednostronnym lub dwustronnym tłoczyskiem;
- siłownik o ruchu wahadłowym;
- siłowniki specjalne.

## ROZDZIAŁ 4

Silniki hydrauliczne są pompami hydraulicznymi o „odwróconym działaniu”, ponieważ przekształcają energię ciśnienia cieczy w pracę mechaniczną. Podczas tego przekształcania silnik pobiera w ciągu jednego obrotu określoną objętość cieczy – wówczas mówimy o chłonności siłownika. Silniki dzielimy na silniki szybkoobrotowe (zębate, łopatkowe, osiowe silniki tłokowe) oraz silniki wolnoobrotowe (tłokowe silniki promieniowe, silniki z przekładnią).

Wolnoobrotowe silniki hydrauliczne ze względu na korzystny przebieg charakterystyki momentu obrotowego, w zakresie niskich obrotów (poniżej  $150 \text{ min}^{-1}$ ) są lepsze od napędów mechanicznych lub elektrycznych. Moment obrotowy już w czasie postoju ma maksymalną wartość i pozostaje prawie stały w całym zakresie zmian obrotów.

Do sterowania kierunkiem przepływu, natężeniem przepływu i ciśnieniem stosuje się wiele elementów zwanych ogólnie zaworami.

Wyróżnia się następujące rodzaje zaworów sterujących przepływem cieczy:

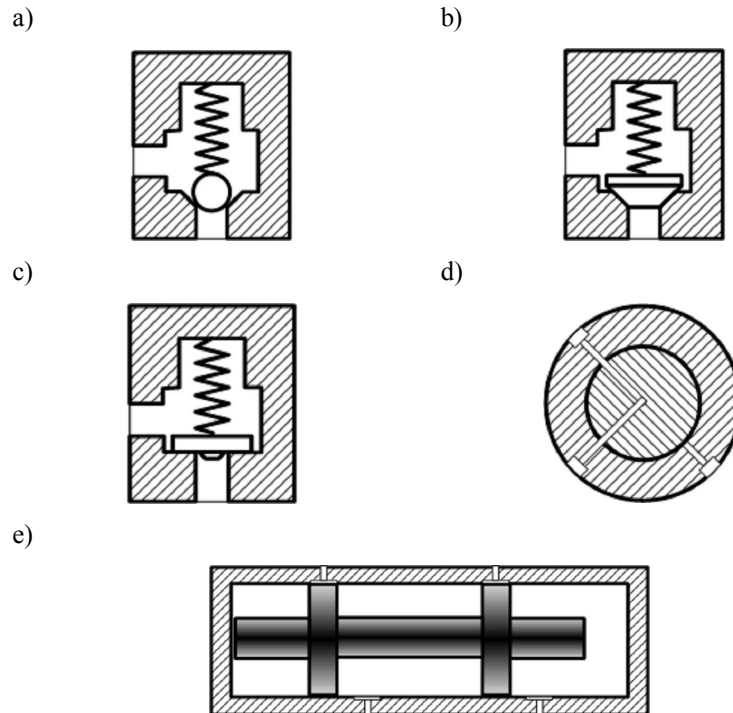
- rozdzielacze hydrauliczne;
- zawory odcinające i dławiące;
- zawory dławiące
- regulatory przepływu;
- serwozawory przepływowe;
- wzmacniacze elektrohydrauliczne proporcjonalne;
- zawory proporcjonalne przepływowe;
- zawory proporcjonalne regulacyjne.

Natomiast do zaworów sterujących ciśnieniem cieczy należą:

- zawory maksymalnie ograniczające wartość ciśnienia w układzie;
- zawory regulujące ciśnienie i redukcyjne;
- serwozawory przepływowe i ciśnieniowe;
- proporcjonalne zawory ciśnieniowe.

Ze względu konstrukcję pary współpracują zaworów hydraulicznych można wyodrębnić zawory gniazdowe (rysunek 4.7a-c) i zawory suwakowe (rysunek 4.7d,e).

Zawory gniazdowe charakteryzuje duża szczelność zamknięcia, opory przepływu cieczy roboczej, brak zużycia ściernego oraz łatwość wykonania. Natomiast zawory suwakowe nie zapewniają szczelności takiej, jaką osiąga się w zaworach gniazdowych i znajdują zastosowanie w budowie rozdzielaczy hydraulicznych (Kotnis, 2008)



Rysunek 4.6. Rodzaje zaworów : a) gniazdowe kulkowe; b) gniazdowe grzybkowe (stożkowe); c) gniazdowe talerzykowe; d) suwakowe obrotowe; e) suwakowe wzdłużne

## 4.4. Cechy użytkowe

Napędy układów hydraulicznych stosowane są do realizacji ruchu obrotowego i postępowego. Wielkość rozwijanych prędkości obrotowych

zblizona jest do prędkości napędów elektrycznych, natomiast prędkości ruchu postępowego do napędów pneumatycznych z możliwością uzyskania bardzo małych prędkości. Osiągają one sprawność rzędu 80-90%, bardzo duże siły w przypadku ruchu postępowego oraz duży moment obrotowy. Obciążenie ma niewielki wpływ na prędkość ruchu. Zakres osiągniętych przesunięć liniowych wynosi od kilkunastu milimetrów do około 1,5 metra. Układy hydrauliczne cechują się szerokimi możliwościami sterowania prędkością poprzez dławienie i wykorzystywanie pomp oraz silników o nastawnej objętości. Mechanizmy są najczęściej indywidualnie zasilane. Stosowanie układów hydraulicznych nie wymusza stosowania specjalnych zabezpieczeń, chociaż niekiedy stosuje się ciecze niepalne z uwagi na palne właściwości oleju hydraulicznego. Układy te wykazują dużą trwałość i pewność działania, a ich konserwacja polega na oczyszczaniu, wymianie filtrów lub usunięciu nieszczelności.

Układy hydrauliczne mają również wady, do których należą:

- stosunkowo duże straty mocy wywołane stratami ciśnienia i stratami objętościowymi w układzie;
- duża wrażliwość na zanieczyszczenia cieczy;
- możliwość wystąpienia przecieków na skutek awarii lub zużycia pierścieni uszczelniających;
- zależność własności statycznych i dynamicznych układów od lepkości cieczy, która silnie zależy od temperatury.

Z przedstawionej w tym rozdziale klasyfikacji hydraulicznych układów sterujących i przełączających są to najczęściej serwozawory elektrohydrauliczne. Serwozawory w porównaniu z konwencjonalnymi zaworami proporcjonalnymi mają znacznie szersze pasmo przenoszenia sygnałów i dlatego odznaczają się dużo większą szybkością odpowiedzi czasowych.

Dlatego stosowane są one przede wszystkim w układach regulacji szybkozmiennych procesów technologicznych. Natomiast konwencjonalne zawory proporcjonalne z powodu gorszych własności dynamicznych są stosowane w układach sterowania procesami wolnozmiennymi. (Kotnis, 2008)

W przypadku pomp zębatych są one wykonywane jako zwykłe lub z kompensacją luzów, dzięki której następuje samoczynne uszczelnienie jako efekt kasowania luzów między elementami pompy. Sprawność całkowita pomp zwykłych wynosi około 0,8, zaś z kompensacją luzów oko-

ło 0,93. Maksymalne ciśnienia robocze pomp zębatych mieszczą się w granicach  $12 \div 25$  MPa.

Z kolei pompy śrubowe odznaczają się dużą równomiernością tłocznego strumienia cieczy oraz cichobieżnością, co należy do ich głównych zalet. Sprawność całkowita pomp śrubowych jest stosunkowo niska i wynosi od  $0,7 \div 0,8$ . Maksymalne ciśnienia robocze pomp śrubowych nie przekraczają wartości 20 MPa. (Kotnis, 2008)

Pompy łopatkowe podwójnego działania są pompami o stałej wydajności, których sprawność całkowita wynosi 0,85, a maksymalne ciśnienie robocze nie przekracza 25 MPa. Pompy łopatkowe pojedynczego działania nie nadają się do pracy przy ciśnieniach przekraczających wartość 16 MPa.

Pompy wielotłokowe, a w szczególności osiowe z wychylnym blokiem cylindrów, cieszą się największym zainteresowaniem spośród pomp wyporowych ze względu na najwyższą sprawność wynoszącą około 0,95 oraz możliwością uzyskiwania wysokich ciśnień –  $35 \div 40$  MPa. (Kotnis, 2008)

Podsumowując, opisane w tym rozdziale cechy i zalety układów hydraulicznych nie oznaczają, że układy te przewyższają inne. Optymalne rozwiązanie można uzyskać wykorzystując odpowiednie zalety układów elektrycznych, mechanicznych i płynowych. Tak, więc w technice najczęściej stosuje się układy mieszane, tzn. elektro-płynowe, w których obwód przenoszenia mocy jest układem hydraulicznym (pneumatycznym), a obwód przenoszenia sygnałów sterujących jest elektrohydrauliczny. Obecnie również ta część ulega zamianie na układ cyfrowy – wówczas taki system nazywamy mechatronicznym.





# 5

## Elektryczne układy wykonawcze

### W tym rozdziale

- Struktura elektrycznych układów wykonawczych
- Elementy i podzespoły układów
- Cechy użytkowe

## 5.1. Struktura elektrycznych układów wykonawczych

W poprzednich rozdziałach przedstawiono strukturę i zasadę działania płynowych układów wykonawczych, które poza wieloma zaletami posiadają również wady.

W obszarach, gdzie mało efektywnym wydaje się zastosowanie takich układów wykorzystywane są elektryczne układy wykonawcze, które odznaczają się przede wszystkim większą sprawnością, tj. korzystniejszym wskaźnikiem uzyskiwanej mocy wyjściowej z jednostki masy. Poza tym w układach tych nastąpił obecnie gwałtowny postęp w technologiach materiałowych co spowodowało pojawienie się nowych, bardziej efektywnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Elektryczne układy wykonawcze posiadają następujące zalety:

- eliminują konieczność stosowania rozbudowanych i szczelnych instalacji do przesyłania czynnika roboczego;
- umożliwia łatwiejsze sterowanie oraz automatyzację działania większej grupy układów wykonawczych;
- umożliwiają zastosowanie stosunkowo prostych i wydajnych układów bezpieczeństwa;
- system elektryczny ma mniej części ruchomych i nie wymaga budowania specjalnych układów zasilania, zbiorników wyrównawczych (akumulatorów), itp.;
- posiada mniejsze wymagania eksploatacyjne.

Do grupy elektrycznych układów wykonawczych zaliczyć można układy elektrodynamiczne i elektromechaniczne. W przetwornikach elektrodynamicznych siły działają na przewodniki, w których przepływa prąd, natomiast w przetwornikach elektromagnetycznych siły występują na powierzchniach rozdziału obszarów o różnej przenikalności.

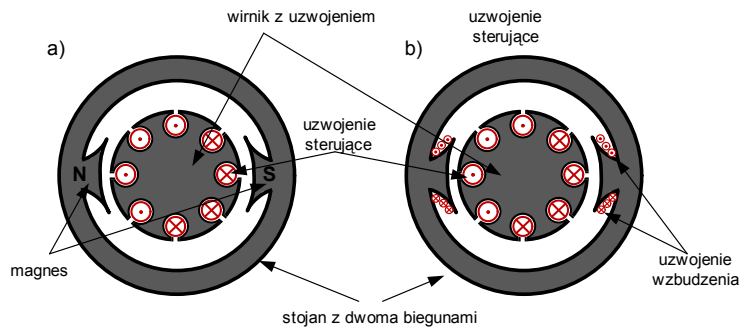
## 5.2. Elementy i podzespoły układów

W przetwornikach elektrodynamicznych wykorzystuje się zjawisko powstawania siły w wyniku oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z przepływającym w nim prądem, gdzie prąd i pole magnetyczne wykonują ruchy względne. Siła ta nazywana jest siłą Lorentza. Przetwornikami pracującymi w oparciu o tę zasadę są silniki prądu stałego i silniki z polem wirującym.

Natomiast zasada działania przetworników elektromagnetycznych opiera się na działaniu siły reluktancji (oporności magnetycznej) oddziałującej na ciało, które przez swoje właściwości materiałowe (permanencje) zmienia pole magnetyczne. Należą do nich:

- przetworniki liniowe i obrotowe;
- magnesy obrotowe;
- silniki krokowe;
- silniki reluktancyjne.

Elementem elektrodynamicznym układu wykonawczego są silniki prądu stałego (rysunek 5.1). Silnik taki ma w stojanie uzwojenie wytwarzające strumień magnetyczny od jednego nabiegownika do drugiego nabiegownika w postaci magnesów trwałych – wzbudzenie magnesem trwałym lub elektromagnesem – wzbudzenie elektromagnesem. Wirnik posiada uzwojenie ułożone na ogół w żłobkach. Pętle uzwojenia wirnika są tak przyłączone do komutatora (kolektora ze szczotkami węglowymi), że doprowadzony przez szczotki prąd w prawej połowie cewki ciągle wpływa „do płaszczyzny kartki”, a wypływa – z lewej połowy. W wyniku tego powstaje niezależny od położenia wirnika, stały strumień magnetyczny. (Schmid, Baumann, Kaufman, Paetzold, & Zippel, 2002)



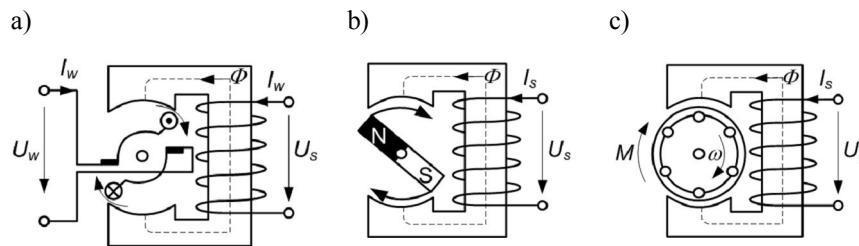
Rysunek 5.1. Silnik prądu stałego z obwodem wzbudzenia:  
a) od magnesu trwałego, b) od elektromagnesu

W zależności od sposobu wytwarzania pola stojana rozróżnia się silniki:

- bocznikowe, w którym uzwojenie wzbudzenia połączone jest równoległe z twornikiem;
- obcowzbudne, w którym uzwojenie wzbudzenia jest zasilane z obcego (niezależnego) źródła napięcia stałego;
- ze wzbudzeniem od magnesów trwałych;
- wzbudzane szeregowo.

Kolejnym rodzajem układu elektrodynamicznego są silniki prądu przemiennego, w których występuje wirujące pole magnetyczne. Dzielimy je na: silniki synchroniczne i asynchroniczne. W obu silnikach stojan zawiera jedno bądź kilka uzwojeń prądu przemiennego lub prądu stałego z liczbą par biegunów, które wytwarzają wirujące pole magnetyczne. W konstrukcji takich silników wirnikiem może być magnes trwały lub cewka zasilana prądem stałym. (Gosiewski, Osiecki, & Panasiuk, 2007)

Jeśli strumień magnetyczny zmienia się wraz ze zmiennym napięciem, to wirnik wykonuje jeden obrót przez naprzemienne przyciąganie i odpychanie podczas każdego okresu zasilającego go prądu zmiennego. Silnik synchroniczny rozwija moment o stałym kierunku tylko przy zadanej prędkości obrotowej wirnika wynikającej z częstotliwości prądu zasilającego. Dlatego też nie może on samodzielnie ruszyć – musi być uruchomiony przez pomocniczy silnik rozruchowy lub uzwojenie asynchroniczne i dopiero po osiągnięciu prędkości kątowej równej częstotliwości prądu zasilania obraca się samodzielnie. Jeśli moment obciążenia przekroczy tzw. moment krytyczny to silnik nie ruszy. (Gosiewski, Osiecki, & Panasiuk, 2007)



Rysunek 5.2. Zasada działania silników elektrycznych:

a) obcowzbudnego silnika prądu stałego; b) silnik synchroniczny z magnesami trwałymi; c) silnik asynchroniczny z wirnikiem klatkowym

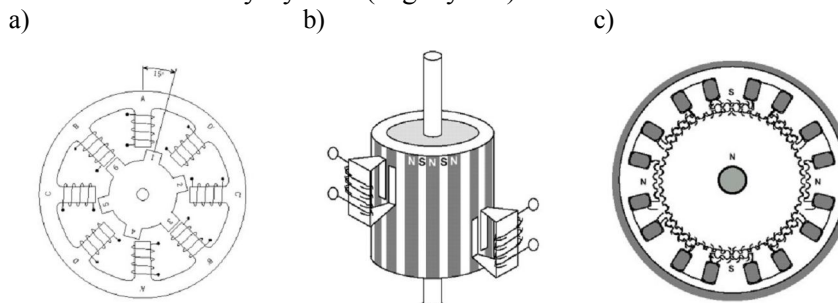
Silnik asynchroniczny zbudowany jest podobnie jak silnik synchroniczny. Stojan pod wpływem pobieranego prądu zmiennego (jedno lub trójfazowego) wytwarza wirujące pole magnetyczne. Jeśli w tym polu znajduje się wirnik, który na swych tworzących ma umieszczone pojedyncze wzajemnie połączone pręty przewodnika, to w prętach tych jest indukowane napięcie, którego wartość zależy od różnicy prędkości wirowania pola magnetycznego stojana i prędkości wirnika. W wirniku klatkowym pręty przewodnika są w stanie zwarcia, co w wyniku daje prąd trójfazowy, który we współdziałaniu z polem magnetycznym stojana wytwarza moment wirnika, a więc silnika. Natomiast wirnik z pierścieniami ślizgowymi jest zasilany napięciem. Przewodniki takiego wirnika są połączone z uzwojeniami, a przez pierścienie ślizgowe również z opornikami, które służą do rozruchu silnika pod obciążeniem, a także do sterowania prędkością kątową wirnika. (Gosiewski, Osiecki, & Panasiuk, 2007)

Kolejną grupę układów elektrodynamicznych stanowią układy liniowe, które realizują siły i przemieszczenia liniowe. W układach mechatronicznych elementy te często nazywane są wibratorami i pracują głównie przy wyższych częstotliwościach

Elementem elektromagnetycznym jest również silnik krokowy. Silnik taki jest silnikiem synchronicznym przekształcającym ciąg sterujących impulsów elektrycznych prądu stałego lub zmiennego na ciąg przesunięć (skoków) kątowych wirnika. Wałek silnika krokowego obraca się o niewielkie wartości kąta pod wpływem impulsów elektrycznych podawanych w odpowiedniej kolejności. Kąty obrotu silnika i ich prędkości są bezpośrednio związane z podawanymi impulsami – kierunek obrotu związany jest z sekwencją podawanych impulsów, prędkość obrotów z częstotliwością podawania tych impulsów, a wartość kąta obrotu z ich liczbą.

Wyróżnia się następujące rodzaje silników krokowych (rysunek 5.3):

- silniki o zmiennej reluktancji (ang. variable reluctance);
- silniki z magnesami trwałymi (ang. permanent magnets);
- silniki hybrydowe (ang. hybrid).



Rysunek 5.3. Zasada działania silników krokowych  
a) o zmiennej reluktancji; b) z magnesami trwałymi; c) hybrydowy

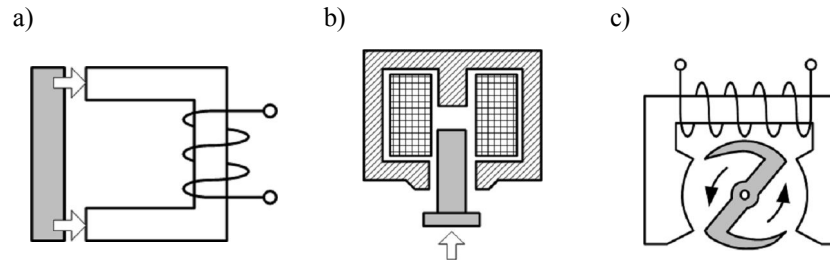
Zasada działania silnika o zmiennej reluktancji polega na wykorzystaniu momentu reluktancyjnego. Silnik taki zbudowany jest z wirnika o wielu zębach wykonanych z miękkiej stali i uzwojenia stojana (rysunek 5.3a). Kiedy uzwojenia stojana są zasilane prądem stałym, bieguny namagnesowują się, a na skutek przyciągania jego zębów przez zasilane bieguny stojana pojawia się ruch wirnika.

Silniki z magnesami trwałymi, nazywane również silnikami kubkowymi, charakteryzują się niską rozdzielczością wartości kąta ( $7,5^\circ \div 15^\circ$ ). Wirnik takiego silnika stanowią magnesy trwałe, a namagnesowane bieguny wirnika wpływają na zwiększenie indukcji magnetycznej (rysunek 5.3b). Dzięki temu silnik taki w porównaniu z silnikiem o zmiennej reluktancji ma lepszą charakterystykę momentową.

Natomiast silnik hybrydowy łączy w sobie zalety silnika ze zmienną reluktancją i silnika z magnesami trwałymi. Jego wirnik ma wiele zębów, podobnie jak w silnikach o zmiennej reluktancji i posiada magnesy umieszczone koncentrycznie wokół osi (rysunek 5.3c). Zęby wirnika zapewniają lepszą drogę przepływowi magnetycznemu, co polepsza jego charakterystyki momentu spoczynkowego i dynamicznego.

Zasada działania silnika hybrydowego polega na tym, że magnes trwały umieszczony na wirniku lub na stojanie wytwarza jednakowo biegunowy strumień magnetyczny, który zamyka się w obwodzie magnetycznym: stojan – szczelina powietrzna – wirnik. Po zasileniu uzwojenia stojana

impulsem sterującym, wzbudzony strumień magnetyczny pod jednym biegunem stojana dodaje się do strumienia od magnesów trwałych – pod drugim się odejmuje. Wirnik zostaje wprowadzony w ruch w taki sposób, aby osie zębów stojana i silnika bieguna o strumieniu wzmacniającym pole magnetyczne pokryły się.



Rysunek 5.3. Zasada działania elektromagnesów podnoszących i obrotowych: a) magnes rdzeniowy; b) magnes kubkowy; c) magnes z obrotową zworą.

Urządzenia wykonawcze zbudowane na bazie elektromagnesów składają się z cewki z żelaznym rdzeniem i ruchomego żelaznego rdzenia zwanego zworą. Przepływ prądu przez cewkę powoduje przyciągnięcie zwory, która ustawia się w taki sposób, aby istniał najmniejszy opór magnetyczny dla linii strumienia magnetycznego. Rozróżnia się elektromagnesy podnoszące z przesuwającą się zworą i elektromagnesy obrotowe.

## 5.3. Cechy użytkowe

Elektryczne układy wykonawcze stosowane są w miejscach, gdzie zachodzi potrzeba generacji ruchu obrotowego rzadziej postępowego. Napędy takich układów uzyskują dużą moc w ruchu obrotowym, natomiast niewielką w ruchu postępowym. Prędkość obrotowa generowana przez napędy elektryczne może wynosić od około 600 do 3000 obr/min, natomiast prędkość silników liniowych dochodzi do 10 m/s. Układy elektryczne są zazwyczaj sterowane metodami obniżającymi sprawność układu, która w prostych rozwiązaniach może wynosić nawet 95% oraz są zasilane z sieci elektrycznej.

Silniki synchroniczne prądu przemiennego w porównaniu z silnikami prądu stałego posiadają mniejsze wymiary, bardzo mały czas reakcji,

## **ROZDZIAŁ 5**

bardzo duży zakres nastawianych obrotów (do 1:20 000), lepsze odprowadzanie ciepła, wyższą sprawność oraz mniejszy ciężar.

Silniki liniowe stosowane w układach elektrycznych mają nieograniczone zakresy przesunięć liniowych. W przypadku pracy w atmosferze wybuchowej wymagają one zabezpieczeń przeciw iskrzeniowych, natomiast w warunkach zawilgocenia konieczne jest wykonywanie specjalnych obudów. Podczas awarii lub niewłaściwej obsługi są nieszkodliwe dla środowiska. Pewność eksploatacji i łatwość obsługi dla układów elektrycznych jest względnie mała z powodu ograniczonego czasu pracy niektórych jej elementów oraz możliwości porażenia prądem elektrycznym.





## Podsumowanie

W książce przedstawiono pojęcia podstawowe związane z mechatronicznymi układami wykonawczymi, przedstawiono definicje, strukturę oraz parametry i cechy użytkowe. Scharakteryzowano tutaj trzy podstawowe grupy układów wykonawczych, tj. układy płynowe (pneumatyczne i hydrauliczne) oraz układy elektryczne.

Z punktu widzenia użytkownika istotnym zadaniem jest dobór odpowiednich parametrów poszczególnych elementów i podzespołów układów wykonawczych. W tym celu przeprowadza się analizę układu wykonawczego stosując podobne zasady jak przy jego projektowaniu. Wybór urządzenia, nie wymaga od użytkownika szczegółowej wiedzy projektanta (konstruktora), ale tylko znajomość podstawowych zjawisk fizycznych zachodzących w danym typie układu, jak również podstawowe zależności matematyczne opisujące takie zjawiska. W tym celu wykonuje się obliczenia wstępne, które pomogą użytkownikowi w doborze elementów układu z katalogów firm.

Tak więc, istotnym etapem wyboru rodzaju i parametrów układu wykonawczego są obliczenia projektowe oraz możliwość ich weryfikacji za pomocą dostępnego oprogramowania projektowego i symulacyjnego. Zastosowanie dostępnego oprogramowania służącego do symulacji działania układów pozwala na weryfikację przeprowadzonych wcześniej uproszczonych obliczeń wstępnych lub też optymalizację doboru parametrów układu napędowego.

Wykorzystując różnego rodzaju programy do projektowania i symulacji należy stosować ogólnie przyjęte sposoby zapisu i oznaczenia. I tak, schematy układów napędu i sterowania rysowane są według przyjętej, umownej symboliki. Każdy element przedstawiany jest symbolem graficznym, którym wyrażana jest funkcja, jaką spełnia w układzie. Symbol taki nie obrazuje natomiast budowy, wielkości i zasady działania elementów. Jednolita forma symboli obowiązująca w skali międzynarodowej ułatwia wymianę informacji technicznych i handlowych w różnorodnych opracowaniach.

Dobierając układ sterowania i napędu do realizacji określonego zadania oblicza się przeważnie siłę, jaką musi dysponować napęd oraz określa zakres, rodzaj i czas jego ruchu oraz charakter obciążenia układu wyko-

nawczego. Najczęściej bazując na tych informacjach wyznacza się przybliżone parametry graniczne układu z odpowiednim zapasem (maksymalne prędkości, siły, itp.). Na tym etapie określa się również elementy sterujące, zawory redukcyjne, dławiące, itp.

Cechą szczególną mechatronicznych układów wykonawczych jest to, że poszczególne elementy układu pochodzą z różnych dziedzin techniki, które muszą być wzajemnie powiązane. Tak, więc projektowanie układów mechatronicznych musi uwzględniać te aspekty. Narzędzia do programowania układów mechatronicznych muszą posiadać elementy do symulacji różnorodnych zjawisk fizycznych oraz śledzić powiązania pomiędzy zagadnieniami sterowania, elektroniki, silników elektrycznych, zjawisk płynowych, itp.

Dlatego, podczas zajęć studenci zostaną zapoznani również z zagadnieniami związanym i z projektowaniem układów wykonawczych z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania projektowego i symulacyjnego.

Podsumowując, przedstawiona tutaj analiza różnego rodzaju układów wykonawczych nie wyczerpuje tego tematu, a jedynie pozwala zorientować się z problematyką mechatronicznych układów wykonawczych. Z tą dziedziną techniki silnie powiązane są dziedziny automatyki, teorii sterowania, elektroniki i sensoryki.





**Literatura**

## ROZDZIAŁ 7

1. Gille, J., Pelegrin, M. i Decaulne, P.: Serwomechanizmy. Tom 1: Teoria i Technika. Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1961.
2. Gosiewski, Z., Osiecki J., Panasiuk J.: *Elementy mechatroniki*. Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2007.
3. Heimann B., Gerth W., Popp K.: *Mechatronika. Komponenty, metody, przykłady*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
4. Kotnis G.: *Budowa i eksploatacja układów hydraulicznych w maszynach*. Wydawnictwo i Handel Książkami "Ka Be", Krosno 2008
5. Kowal J.: *Podstawy automatyki*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2006.
6. Kuranowski A., Mirska – Świętek M.: *Mechanizmy wspomagające w pojazdach samochodowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002.
7. Mednis W.: *Hydrauliczne napędy i ich sterowanie. Ćwiczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
8. Niezgoda J., Pomierski W.: *Sterowanie pneumatyczne. Ćwiczenia laboratoryjne*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1998.
9. Olszewski M.: *Podstawy Mechatroniki*.: Wydawnictwo REA s.j., Warszawa 2006.
10. Pizoń A.: *Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
11. Schmid D., Baumann A., Kaufman H., Paetzold H., Zippel B.: *Mechatronika*. Wydawnictwo REA s.j., Warszawa 2002.
12. Szenajch W.: *Napęd i sterowanie pneumatyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.