



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika Wroclawska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Zbigniew Smalec

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji
Na Wydziale Mechanicznym
Politechniki Wrocławskiej

Wstęp do mechatroniki

Recenzent:
Dr inż. Stanisław Iżykowski

Wrocław, 2010

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

ISBN 978-83-7493-591-3

Spis treści

1. Podstawy mechatroniki	3
1. 1. Początki i definicja pojęcia mechatroniki	3
1. 2. Klasyfikacja, własności i rozwój wyrobów mechatronicznych	4
1. 3. Mikroprocesory w wyrobach mechatronicznych	8
1. 4. Struktura systemów mechatronicznych i ich działanie	9
2. Sygnały i ich transmisja	12
2. 1. Sygnały	12
2. 2. Transmisja sygnałów cyfrowych	15
2. 3. Interfejsy komunikacyjne	17
3. Sensory	19
3. 1. Wstęp	19
3. 2. Budowa i rodzaje sensorów	19
3. 3. Wymagania i dobór sensorów oraz ich zastosowanie	24
4. Aktuatory	28
4. 1. Wstęp	28
4. 2. Rodzaje aktuatorów	30
4.2.1 Aktuatory elektryczne	32
4.2.2 Aktuatory hydrauliczne i pneumatyczne	41
4.2.3 Aktuatory niekonwencjonalne	44
4. 3. Dobór napędów i własności aktuatorów	47
5. Sterowniki i systemy wbudowane	50
5. 1. Sterowniki przemysłowe PLC, CNC i RC	50
5. 2. Systemy operacyjne czasu rzeczywistego	54
5. 3. Systemy wbudowane	55
6. Sieciowe systemy komunikacyjne	62
6. 1. Wstęp	62
6. 2. Przykłady sieci komunikacyjnych	66
6. 3. Sieci komunikacyjne w samochodach	68
7. Interfejsy człowiek-maszyna	72
8. Przykłady wyrobów mechatronicznych	77
Literatura	81

1. Podstawy mechatroniki

1. 1. Początki i definicja pojęcia mechatroniki

Słowo *mechatronika* powstało z połączenia części słów angielskich *MECHANism* i *elecTRONICS*. Pojęcie (termin) **mechatronika** zostało po raz pierwszy użyte w 1969 r. przez japońską firmę Yaskawa Electric Cooperation. Od 1971 r. pojęcie „mechatronika” było chronione przez tę firmę jako nazwa handlowa. W tym okresie pod tym pojęciem rozumiano uzupełnienie składników mechanicznych przez układy elektroniczne w takim sprzęcie jak np. aparaty fotograficzne z lustrzanką. W 1982 r. zrezygnowano z ochrony tej nazwy i od tej pory termin **mechatronika** jest do swobodnego użytku.

W literaturze przedmiotu spotka się wiele definicji mechatroniki, ale żadna z nich nie jest ogólnie obowiązująca. Prawie we wszystkich z nich kładzie się nacisk na funkcjonalną integrację mechanicznych układów wykonawczych z elektroniką i sterowaniem komputerowym. I tak wg IFToMM (1995 r.) mechatronika jest synergiczną kombinacją inżynierii mechanicznej, inżynierii elektrycznej i technologii informatycznej w zintegrowanym projektowaniu zaawansowanych (inteligentnych) układów technicznych w zespołach i maszynach. Synergia jest to współdziałanie kilku czynników dające łączny efekt skuteczniejszy niż suma ich oddzielnych działań. Natomiast wg H. J. Herpel'a (1996 r.) układ (system) mechatroniczny stanowi wyrób końcowy procesu optymalizacji, który musi uwzględniać ograniczenia ekonomiczne, mechaniczne, wytwórcze, elektryczne, elektroniczne i informatyczne. Z kolei Heimann B., Gerth W., Popp K. uważają, że mechatronika obejmuje programowalne urządzenia elektroniczne i systemy elektromechaniczne o wbudowanej, rozproszonej strukturze sensorów, przetwarzania sygnałów, aktuatorów i komunikacji.

Wszystkie definicje mechatroniki łączy to, że określają ją one jako interdyscyplinarny sposób postępowania podczas rozwoju wyrobów oraz współdziałanie składników z poszczególnych obszarów w celu uzyskania funkcjonalności tych wyrobów. Jeżeli jednak wcześniej na plan pierwszy wysuwał się wyrób mechatroniczny, to obecnie z mechatroniką są również związane przebiegi i zależności występujące podczas rozwoju i produkcji systemów mechatronicznych. Mechatronika stanowi nowy rodzaj myślenia i działania, w którym wszystkie uczestniczące dyscypliny muszą być wspólnie rozpatrywane i traktowane. Jest to zatem więcej niż tylko suma tych obszarów.

Można zatem sformułować jeszcze następującą definicję mechatroniki: mechatronika jest największą z możliwych integracją mechaniki, elektrotechniki, elektroniki i informatyki w jednym nośniku funkcji. Obejmuje to zarówno integrację funkcyjną, jak i sposób postępowania podczas rozwoju i produkcji wyrobów. Jako system mechatroniczny określany jest funkcjonalny i przestrzennie zintegrowany układ mechaniczno-elektryczny, w którym czujniki (sensory) przyjmują informacje, układy mikroprocesorowe przetwarzają te informacje, a elementy wykonawcze (aktuatory) w celowy sposób wytwarzają siły lub ruchy, które oddziałują na system lub jego otoczenie. Zatem mechatronika jest to synergiczna integracja mechaniki, elektroniki, automatyki i informatyki w procesie projektowania i wytwarzania produktów. Obecnie przez mechatronikę rozumie się działalność inżynierską obejmującą projektowanie, badania oraz eksploatację maszyn i urządzeń, w których występuje wysoki poziom integracji funkcjonalnej układów mechanicznych z elektroniką i sterowaniem komputerowym. Mechatronika jest dziedziną

interdyscyplinarną, łączącą w sposób synergiczny wiedzę z klasycznej budowy maszyn, hydrauliki, pneumatyki, elektrotechniki, elektroniki, optyki i informatyki. Celem mechatroniki jest poprawianie (doskonalenie) funkcjonalności systemów technicznych oraz tworzenie nowych koncepcji maszyn i urządzeń z wbudowaną "sztuczną inteligencją".

Mechatronika jest synergicznym połączeniem mechaniki precyzyjnej, elektronicznych układów sterujących i informatyki w celu projektowania, wytwarzania i eksploatacji inteligentnych systemów automatyki. Mechatronika nie jest tożsama ani z automatyką, ani robotyką, czy też automatyzacją produkcji. Mechatronika może być uznana za nowoczesne ujęcie technik automatyzacji dla szeroko rozumianych potrzeb inżynierii i edukacji. Można przyjąć, że mechatronika jest interdyscyplinarną dziedziną nauki i techniki zajmującą się generalnie problemami mechaniki, elektroniki i informatyki. Jednak zawiera ona także wiele obszarów para-mechatronicznych, które tworzą fundament mechatroniki i pokrywają wiele znanych dyscyplin, takich jak: elektrotechnika, energoelektronika, technika cyfrowa, technika mikroprocesorowa, techniki regulacyjne i inne.

1. 2. Klasyfikacja, własności i rozwój wyrobów mechatronicznych

Pod koniec lat siedemdziesiątych XX w. w Japonii dokonano klasyfikacji wyrobów mechatronicznych na cztery grupy różniące się stopniem integracji podsystemów elektronicznych i mikroprocesorowych z mechaniką:

1. urządzenia mechaniczne uzupełnione o układy elektroniczne dla poprawy ich funkcjonalności,
 2. znaczna poprawa funkcjonalności urządzeń mechanicznych (np. maszyny szwalniczej) uzyskana przez wbudowanie układów elektronicznych, ale bez zmiany ich tradycyjnego, mechanicznego interfejsu,
 3. całkowite zastąpienie mechanizmów wewnętrznych urządzenia przez układ elektroniczny (np. zegarek cyfrowy),
 4. synergiczna integracja elementów mechanicznych i elektronicznych (w tym sterowania) w nowych jakościowo maszynach i urządzeniach (np. kserokopiarka).
- Obecnie przeważa opinia, że urządzenia mechatroniczne powinny w pełni spełniać warunki podane w punkcie 4.

Produkty mechatroniczne są zintegrowanymi zespołami elementów składowych i podzespołów spełniających różne funkcje, działających na różnych zasadach fizycznych i wykorzystujących różne zjawiska. Ich głównym zadaniem jest czynność mechaniczna, a istotą jest możliwość reagowania na sygnały zewnętrzne docierające do urządzenia poprzez system czujników. Pomiędzy sensorami (czujnikami) a elementami wykonawczymi, znajdują się układy przetwarzania i analizy sygnałów, jak również element decyzyjny wyposażony w odpowiedni program działania urządzenia.

Wyroby mechatroniczne charakteryzują się następującymi cechami:

- **multifunkcjonalnością**, oznaczającą łatwość realizacji różnych zadań przez jedno urządzenie, np. przez zmianę oprogramowania,
- **inteligencją**, oznaczającą możliwość podejmowania decyzji i komunikacji z otoczeniem,
- **elastycznością**, czyli łatwością modyfikacji konstrukcji na etapie projektowania, produkcji oraz eksploatacji urządzenia, np. przez zastosowanie konstrukcji modułowej,

- **możliwością niewidocznego dla operatora sposobu działania**, co wymaga zastosowania interfejsu użytkownika dla komunikowania się z operatorem,
- **zależnością od wymagań rynkowych i możliwości technologicznych wykonania**.

Jednak najważniejszym aspektem mechatroniki jest to, że maszyny i urządzenia mechatroniczne są wyrazem naśladownictwa przyrody (bionika). W otoczeniu naturalnym takie układy są powszechne i umożliwiają funkcjonowanie istot żywych w zmiennych warunkach naturalnego środowiska. Istotną cechą urządzeń mechatronicznych jest zdolność do wiernego przetwarzania i przekazywania informacji (w formie sygnałów mechanicznych, elektrycznych, pneumatycznych, optycznych i innych), przy jednoczesnym wysokim stopniu automatyzacji tych urządzeń. Systemy mechatroniczne wyposażone są w czujniki zbierające sygnały ze swojego otoczenia, programowalne układy przetwarzania i interpretacji tych sygnałów oraz zespoły komunikacyjne i urządzenia wykonawcze oddziałujące odpowiednio na otoczenie. Ich inteligencja polega na reagowaniu na polecenia człowieka i otoczenia oraz przekazywaniu informacji zwrotnych i realizowaniu tych poleceń. Projektowanie wyrobów mechatronicznych, ich budowa, użytkowanie, analiza pracy i diagnostyka eksploatacyjna, wymagają specjalnego podejścia metodycznego i systemowego, niestosowanego w konwencjonalnych dziedzinach techniki, np. w mechanice.

Wcześniej elektronika pojawiała się jako dodatek podczas wyposażania maszyn i instalacji i często służyła ona tylko do zwiększenia wygody obsługi. Jednak takie podejście w ostatnich latach zostało już w znacznym stopniu zarzucone. I tak np. w maszynach drukarskich napęd i cykl pracy był realizowany w sposób czysto mechaniczny za pomocą wału głównego, przekładni i sprzęgieł. Natomiast obecnie elektronika jest integralną częścią całego procesu drukowania, co pozwala na w pełni automatyczny jego przebieg. Największa zaleta takiego rozwiązania polega na tym, że takie systemy są tańsze, ponieważ części mechaniczne można zastąpić tańszą elektroniką, która jest ponadto bardziej niezawodna i lepsza w pielęgnacji, gdyż jest ona odpowiednia do samonadzorowania, a także dokładniejsza dzięki temu, że precyzję uzyskuje się nie przez stabilność mechaniczną, a za pomocą elektronicznych pomiarów i regulacji. Obecnie na rynek wchodzi coraz nowsze wyroby mechatroniczne.

I tak np. nowy samochód osobowy Mercedes klasy S Coupé dysponuje aktywnym zawieszeniem, dzięki czemu komfort jazdy znacznie się poprawił. Innymi przykładami systemów mechatronicznych są: odtwarzacz CD, system ABS w samochodach, automatyczna przekładnia (skrzynia biegów), elektrownie wiatrowe, a nawet taki sprzęt AGD jak pralka automatyczna. Systemy mechatroniczne pozwalają na to, że dzięki ściślejszej interakcji budowy maszyn, elektrotechniki/ elektroniki i informatyki podczas projektowania, wytwarzania i pielęgnacji w nowoczesnych maszynach (wyrobach) będzie można wykorzystać wiele efektów synergii. Ważnym aspektem jest także miniaturyzacja wyrobów, dzięki czemu ciągle coraz więcej funkcji i niezbędnych do tego celu składników można umieścić wewnątrz małej objętości. System mechatroniczny zawiera zawsze składniki mechaniczne, elementy elektroniczne w postaci standardowego sprzętu, łącznie z sensorami i aktuatorami, modułami regulacji wraz z przetwarzaniem informacji oraz odpowiednie oprogramowanie. Całościowy sposób rozpatrywania dotyczy zarówno rozwoju systemu mechatronicznego jak i jego technicznej realizacji.

Mechatronika zaczęła się dynamicznie rozwijać dopiero w latach 80. XX w. i to głównie ze względu na wymagania rynku. Natomiast elementy elektryczne i elektroniczne w układach mechanicznych zaczęto wprowadzać już w latach 40. XX w., a urządzenia z tego okresu można nazwać **pierwszą generacją** mechatroniki.

Rozwój informatyki od początku lat 70. XX w. spowodował, że logiczne i decyzyjne elementy elektroniczne zaczęto zastępować mikroprocesorami z odpowiednim oprogramowaniem. Etap ten można uznać za **drugą generację** mechatroniki. Lata 80. XX w. przyniosły dalszy jej rozwój, zmierzający w kierunku uzyskania zintegrowanych elementów zapewniających funkcjonowanie skomplikowanych urządzeń, maszyn i systemów. Zapoczątkowało to rozwój mechatroniki **trzeciej generacji**, której przedmiotem zainteresowania są urządzenia charakteryzujące się wielofunkcyjnością i dużą złożonością konstrukcji.

Pierwotnie, tzn. na początku lat 70. XX w., termin mechatronika odnosił się do kombinacji mechaniki i elektroniki. Jednak wskutek rosnącej integracji systemów wbudowanych ES (ang. *Embedded Systems*) oprogramowanie stało się dodatkowym nośnikiem funkcji, który umożliwił uzyskanie w nowych wyrobach prawie dowolnej funkcjonalności. Był to istotny przeskok w rozwoju wyrobów, który spowodował, że mechatronika uzyskała strategiczne znaczenie w innowacyjności i konkurencji na rynku.

Uważa się, że pierwszym wyrobem mechatronicznym była obrabiarka sterowana numerycznie NC (ang. *Numerical Control*) do produkcji śmigieł helikoptera, skonstruowana w MIT (ang. *Massachusetts Institute of Technology*, USA) w 1952 r. Do podstawowych produktów mechatronicznych można zaliczyć drukarki laserowe lub atramentowe, kserokopiarki nowej generacji, sterowane cyfrowo maszyny do szycia i maszyny dziewiarskie, elektronicznie sterowany silnik spalinowy, różne systemy (np. przeciwblokujące i przeciwoślizgowe) w technice samochodowej, obrabiarki sterowane numerycznie, roboty i manipulatory itp. Produktami mechatronicznymi są miniaturowe kamery video, odtwarzacze CD i wiele mikromaszyn, ale również duże maszyny rolnicze i drogowe nowej generacji oraz wielkogabarytowe systemy i linie produkcyjne.

Mechatronika pozwala na uzyskanie o wiele większych efektów aniżeli konwencjonalnie realizowany rozwój i działanie elektromechanicznych lub elektroniczno-mechanicznych układów z sumowanym i najczęściej dodatkowym uzupełnieniem biernych mechanicznych struktur za pomocą wspomaganym programowo i elektronicznie sterowanych (regulowanych) składników. Systemy mechatroniczne pozostają pod silnym wpływem realizowanego od początku interdyscyplinarnego projektowania, konstrukcji i rozwoju złożonych urządzeń, systemów i instalacji. Dzięki temu uzyskuje się całkowicie nowe, częściowo nawet zaskakujące możliwości techniczne, umożliwiające przesunięcie funkcjonalności z biernych struktur mechanicznych do aktywnych, sterowanych programowo elektronicznych składników, w połączeniu z zaawansowanymi (inteligentnymi) czujnikami i aktuatorami oraz elektronicznym przetwarzaniem informacji z odpowiednim oprogramowaniem. Przykładami systemów mechatronicznych w przemyśle samochodowym są: elektroniczne zarządzanie silnikiem, układ zapobiegający blokowaniu kół podczas hamowania (ABS), układ przeciwdziałający poślizgom (ASR) oraz układ regulacji dynamiki jazdy (FDR). Natomiast przykładami układów mechatronicznych w budowie maszyn i instalacji są: pracujące w znacznym stopniu autonomicznie roboty przemysłowe, urządzenia z samoczynnymi układami mocowania, narzędzia z samoczynnym, automatycznym nastawianiem oraz bezstykowo regulowane łożyska powietrzne i magnetyczne. W przemyśle elektrotechnicznym, elektronicznym i komputerowym przykładami systemów mechatronicznych są: nowe generacje przyrządów pomiarowych, układy pomiarowe, czujniki, aktuatory, kamery video, comcordery, dyski twarde, drukarki, plotery i kserografy. Rozwój tego rodzaju nowoczesnych wyrobów wiąże się realizacją

trudnych zadań o bardzo wysokich wymaganiach dotyczących opanowania i stosowania najnowszych technologii z obszaru: mechaniki, elektroniki/mikroelektroniki i informatyki, aktuatoryki, sensoryki, optyki oraz techniki mikrosystemów i fotoniki.

Wyroby mechatroniczne odznaczają się uproszczoną konstrukcją mechaniczną, wyższą dokładnością, zintegrowanym samo-nadzorowaniem i diagnostyką błędów, rozszerzonymi warunkami pracy oraz łatwiejszą obsługą. Uzyskiwana w ten sposób rozszerzona funkcjonalność wyrobów jest często rozstrzygającym czynnikiem przewagi konkurencyjnej na rynku. Dzięki temu dają się wytwarzać w pełni nowe wyroby lub też wyroby ze znacznie ulepszonymi własnościami, np. w samochodach systemy do kierowania, hamowania i zarządzania silnikiem oraz do aktywnego zapewniania bezpieczeństwa (ABS, ESP), w obszarze artykułów konsumpcyjnych kamery z napędami piezoelektrycznymi, odtwarzacze CD z ultraszybkimi jednostkami pozycjonującymi, w medycynie inteligentne protezy i roboty (ang. *human assistance*) lub w technikach wytwarzania mikroroboty z elementami z pamięcią kształtu.

Wymagane kompetencje inżynierów uczestniczących w pracach nad rozwojem wyrobów mechatronicznych, ze względu na pogłębiającą się specjalizację, wymagają podejścia interdyscyplinarnego. Bardziej wskazana jest wiedza wykraczająca poza poszczególne obszary w postaci wspólnych podstaw, aby umożliwić synergiczną współpracę specjalistów z różnych dziedzin dla zapewnienia optymalnego ukształtowania wyrobu.

Systemy mechatroniczne, w porównaniu z czysto mechanicznymi rozwiązaniami, mają cały szereg zalet:

- są one **tańsze i lżejsze**, ponieważ części mechaniczne zostały zastąpione tańszą elektroniką (*przykład*: drukarka komputerowa),
- są one **niezawodne i bardziej użyteczne**, ponieważ są one przystosowane do samonadzorowania, a nawet często także do zdalnej diagnostyki (*przykład*: komputer pokładowy samochodu),
- są one **dokładniejsze**, ponieważ uzyskują precyzję nie w wyniku mechanicznej stabilności, ale za pomocą elektronicznej techniki pomiarowej i regulacyjnej (*przykład*: robot),
- są one **efektywniejsze w zużyciu energii**, ponieważ dzięki wbudowanej „inteligencji” mogą pracować w pobliżu optymalnego stopnia działania (*przykład*: regulacja ogrzewania),
- są one **dłuższe w użytkowaniu**, ponieważ przez prostą wymianę oprogramowania mogą one mieć inne, lub nawet w pełni nowe własności (*przykład*: nowoczesna pralka),
- tym samym są one również **przyjazne** dla użytkownika, a także **odporne na błędy obsługi**, ponieważ wiele wskaźników, pokręteł i dźwigni zostało zastąpionych kilkoma klawiszami i monitorem komputerowym i w ten sposób system może się „bronić” przed błędami obsługi (*przykład*: nowoczesna instalacja produkcyjna),
- wreszcie jest wiele urządzeń, do których żeśmy się od dawna przyzwyczaili, a których bez mechatroniki nie można sobie nawet wyobrazić (*przykład*: odtwarzacz wideo, ABS).

Różnego rodzaju systemy techniczne, które są układami mechatronicznymi mają ogólnie następujące cechy: wysoką złożoność, wysoki stopień integracji składników mechanicznych, elektrycznych i przetwarzania informacji, występuje w nich optymalizacja systemu jako całości. W wyrobach mechatronicznych stopień powiązania poszczególnych składników jest tak wysoki, że ich optymalne projektowanie wymaga realizacji równoległego działania dla wszystkich składników,

przy czym system od początku musi być rozpatrywany jako funkcjonalnie i przestrzennie zintegrowany układ całkowity.

Celami rozwiązań mechatronicznych są:

- realizowanie nowych funkcji,
- poprawa sposobów zachowania się systemu przez sterowanie lub regulację bez ingerencji z zewnątrz,
- rozszerzenie granic zastosowania,
- samoczynne nadzorowanie systemu i/lub diagnostyka uszkodzeń,
- osiągnięcie integracji struktury w małej przestrzeni,
- możliwość dołączenia podsystemów mechatronicznych jako sprawdzonych podzespołów lub zespołów,
- poprawa pewności działania.

1. 3. Mikroprocesory w wyrobach mechatronicznych

Zdecydowana większość produkowanych obecnie mikroprocesorów nie znajduje zastosowania w budowie komputerów, ale stanowi część innych wyrobów, takich jak samochody, samoloty, domy, układy sterowania maszyn, satelity, telefony komórkowe, pralki, automaty do gry czy kamery. Są to głównie mikrosterowniki (mikrokontrolery). Szacuje się, że w 2000 r. wyprodukowano około 150 mln mikroprocesorów do komputerów i ponad 7 mld mikrokontrolerów. Mikrokontrolery stanowiły więc ponad 90% wszystkich procesorów. Temu fascynującemu rozwojowi techniki mikroprocesorowej towarzyszy równocześnie większa wydajność, miniaturyzacja i dyspozycyjność innych komponentów do konstrukcji urządzeń mechatronicznych: silników, przekładni, baterii, połączeń, sensorów itp.

Głównymi powodami wbudowywania mikroprocesorów w urządzenia mechaniczne są:

1. poszerzenie własności,
2. uproszczenie,
3. innowacyjność.

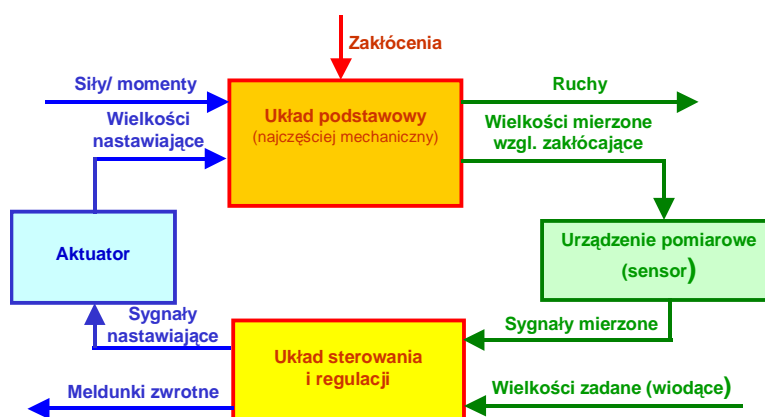
Zasadnicza konstrukcja urządzenia pozostaje taka sama, a często jest już nawet przestarzała. Dodanie mikroprocesora może rozszerzyć lub poprawić dokładność, szybkość pracy czy elastyczność zastosowania, zredukować wymagania eksploatacyjne i poprawić niezawodność. Typowym tego przykładem jest układ sterowania silnikiem samochodowym. Układ ten zwiększa ekonomiczność silnika, daje łagodniejszy bieg jałowy i dłuższe okresy między kolejnymi przeglądami technicznymi.

System mikroprocesorowy może zastąpić jeden lub kilka skomplikowanych mechanizmów. Przykładem tego może być modernizacja nacinania gwintów na tokarce. W tokarce tradycyjnej do napędu wrzeciona i śruby pociągowej służy ten sam silnik. Do zapewnienia możliwości nacinania gwintów o różnym skoku konieczne jest wykorzystanie zestawu wymiennych kół zębatach i przekładni wielostopniowej o bardzo dużej liczbie przełożeń. Natomiast rozwiązanie mechatroniczne (tokarka sterowana numerycznie CNC) polega na zastosowaniu oddzielnych silników do napędu śruby pociągowej i wrzeciona tokarki, a przekładnia zębata staje się zbędna. Elektroniczne sterowanie jest wygodniejsze, ponieważ „przekładnia” elektroniczna jest bezstopniowa i umożliwia nacinanie gwintów o dowolnym skoku. Konstrukcja mechaniczna takiej tokarki jest uproszczona, a jej zespoły mogą być używane bardziej elastycznie, co sprzyja oszczędności kosztów. Zastosowanie

mikroprocesorów umożliwia wytwarzanie takich produktów czy systemów, które dotychczas nie mogły być zrealizowane. Chodzi tutaj przede wszystkim o roboty i maszyny, które wymagają zaawansowanych technologii sensorycznych, jak np. rozpoznawania obrazu. Dwa pierwsze powody nie wykluczają się wzajemnie. W wielu przypadkach zastosowanie mikroprocesorów daje podwójną korzyść: poprawia osiągi i obniża koszty.

1. 4. Struktura systemów mechatronicznych i ich działanie

Na rys.1.1 pokazano ogólną budowę systemu mechatronicznego. **Układ podstawowy** składa się ze struktury zawierającej elementy mechaniczne, hydrauliczne lub pneumatyczne, albo ich kombinacji, w której realizowane jest określone działanie (np. ruch, siła, itp.).



Rys. 1.1 Struktura układu mechatronicznego

Czujnik (sensor) służy do określania stanu wybranych wielkości systemu, zwykle przetwarza wielkości fizyczne w sygnały elektryczne, które następnie są wykorzystywane jako informacje.

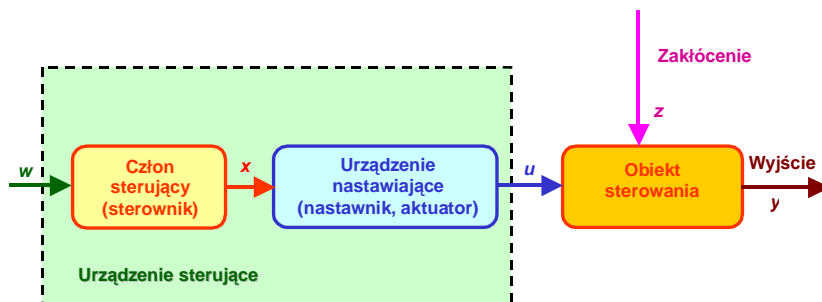
Przetwarzanie informacji określa konieczne oddziaływania, aby w określony sposób wpływać na stan wielkości systemu i które obecnie jest najczęściej realizowane w postaci cyfrowej (w mikrosterowniku).

Aktuator (element wykonawczy) służy do realizacji oddziaływań bezpośrednio na układ podstawowy; dostarcza (nastawia) siły i momenty, które prowadzą do ruchu systemu.

Systemy mechatroniczne dają charakterystyczną strukturę wyrobów. Składają się one z części mechanicznej (struktura podstawowa), akuatorów, sensorów i przynajmniej jednego układu mikroprocesorowego z oprogramowaniem do przetwarzania informacji. Układy elektryczne i elektroniczne oraz informatyczne uzupełniają podstawową strukturę mechaniczną. Nieograniczona funkcjonalność całego systemu jest uzyskiwana przez współdziałanie wszystkich składników. Realizacja funkcjonalności przez poszczególne składniki nie jest możliwa. Mikroprocesor odgrywa przy tym centralną rolę. Czujniki mierzą wielkości stanu systemu i otoczenia. Są one następnie przetwarzane za pomocą oprogramowania i elektroniki cyfrowej. Dzięki algorytmom sterującym i regulacyjnym są określone konieczne oddziaływania na układ mechaniczny, które są następnie przekazywane w postaci sygnałów nastawiających do akuatorów. Akuatory przetwarzają te sygnały

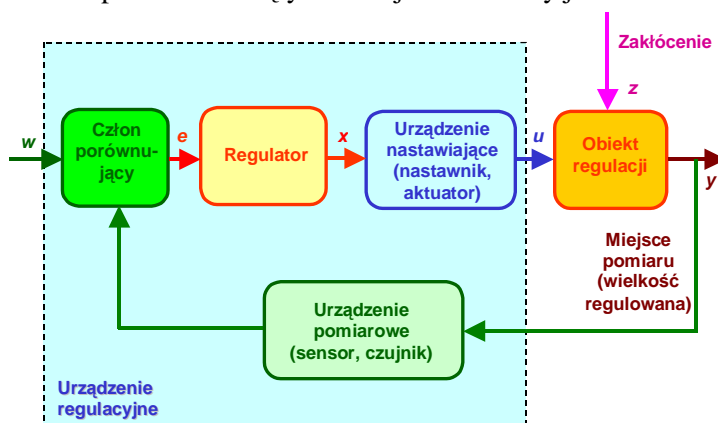
w celowe ruchy i oddziałują na układ mechaniczny i tym samym wielkości stanu. Zatem typowy system mechatroniczny przyjmuje sygnały, przetwarza je i przekazuje dalej sygnały, które następnie są zamieniane np. w siły i ruchy.

W systemach technicznych (np. urządzeniach) bardzo często występuje konieczność realizacji takich działań, żeby zmienne w czasie wielkości systemu miały **określone przebiegi**. W najprostszym przypadku wielkości te powinny mieć stałe wartości, pomimo działających na system **zakłóceń**. Tego rodzaju zadania można realizować przez zastosowanie **sterowania i regulacji**. Należy zatem wyjaśnić różnicę między oboma tymi pojęciami.



Rys. 1.2 Sterowanie

I tak **sterowanie** jest działaniem, w którym należy zrealizować żądany przebieg czasowy własnej wielkości wyjściowej układu, przy czym wielkość na którą się oddziałuje nie jest mierzona (rys.1.2). Cechą charakterystyczną sterowania jest **otwarty przebieg działania**. Nie ma sprzężenia zwrotnego wielkości wyjściowej układu z jego wejściem. Otwarty sposób działania jest często określany jako **sterowanie w obwodzie otwartym**. Natomiast pod pojęciem **regulacji** rozumie się takie działanie, w którym **wielkość regulowana** jest ciągle mierzona i porównywana z **wielkością zadaną** (wiodącą). Za pomocą wyniku tego porównania (różnicy), **uchybu regulacji**, realizowane jest takie oddziaływanie na wielkość regulowaną, żeby była ona równa wielkości zadanej (rys.1.3). Tego rodzaju działanie odznacza się występowaniem **sprzężenia zwrotnego** (ujemnego) wyjścia układu z jego wejściem. Zbudowany w taki sposób zamknięty obwód jest określany jako **obwód regulacji**.



Rys. 1.3 Regulacja

W tab.1.1 zestawiono cechy układów sterowania i regulacji.

Tab. 1.1 Porównanie sterowania z regulacją

Cechy charakterystyczne	Sterowanie	Regulacja
Droga (obwód) działania	Otwarta (łańcuch sterowania)	Zamknięta (obwód regulacji)
Pomiar i porównywanie nastawianej wielkości	Wielkość sterowana nie jest mierzona i porównywana	Wielkość regulowana jest mierzona i porównywana (z wielkością zadaną)
Reakcja na zakłócenia (ogólnie)	Jest reakcja tylko na te zakłócenia, które są mierzone i przetwarzane w układzie	Występuje przeciwdziałanie wszystkim zakłóceniom, które wpływają na regulowany układ
Reakcja na zakłócenia (czasowo)	Reaguje szybko, jeżeli zakłócenie jest bezpośrednio mierzone	Reaguje dopiero wtedy, gdy zmienia się różnica pomiędzy wartością zadaną i wartością regulowaną
Nakłady techniczne	Małe nakłady, jeżeli nie występują żadne zakłócenia. Wysokie nakłady, jeżeli musi być uwzględnionych wiele zakłóceń.	Duże nakłady: • pomiar wielkości regulowanej, • porównywanie wartości zadanej z rzeczywistością, • wzmocnienie sygnału.
Przebiegi dla niestabilnych układów	Sterowanie jest nieprzydatne w przypadku niestabilności	W niestabilnych układach musi być zastosowana regulacja

W układach sterowania, w których zakłócenia nie są mierzone, wielkości wyjściowe (sterowane) mogą odbiegać od wielkości zadanych. Natomiast w układach regulacji wszystkie działające na obiekt regulacji zakłócenia są określane przez pomiar wielkości regulowanej. Jedynym problemem jest to, że doregulowanie spowodowane działaniem uchybu (odchylenia regulacji) odbywa się po zadziałaniu zakłócenia na układ, a zatem z opóźnieniem.

Istnieje wiele różnych rozwiązań układów sterowania i regulacji i tak np. ze względu na rodzaj zadania regulacyjnego rozróżnia się układy:

- **regulacji stałowartościowej (stabilizujące)** oraz
- **układów regulacji nadążnej (śledzące).**

Tab.1.2 Wymagania dotyczące układów regulacji

Kryterium	Objaśnienie
Stabilność	Układ regulacji musi być stabilny. Oznacza to, że występujące w tym układzie sygnały dynamiczne muszą mieć odpowiednie przebiegi w czasie.
Dokładność statyczna	Stacyczne odchylenie regulacji (uchyb) po wystąpieniu zakłócenia wzgl. zmianie wielkości zadanej powinno być równe zero lub nie przekraczać zadanych granic.
Własności dynamiczne	Układ regulacji musi być wystarczająco szybki, tzn. dynamiczne przebiegi sygnałów w przypadku wystąpienia zakłócenia lub zmiany wielkości zadanej muszą być zakończone w określonym czasie.
Tłumienie	Odpowiedź układu regulacji na wystąpienie zakłócenia wzgl. zmianę wielkości zadanej musi być w wystarczającym stopniu tłumiona, tzn. powinno być zapewnione ustalenie wielkości regulowanej i tym samym stabilność układu.
Odporność	Układ regulacji powinien być możliwie nieczuły i odporny na zmiany dowolnych parametrów obiektu regulacji.

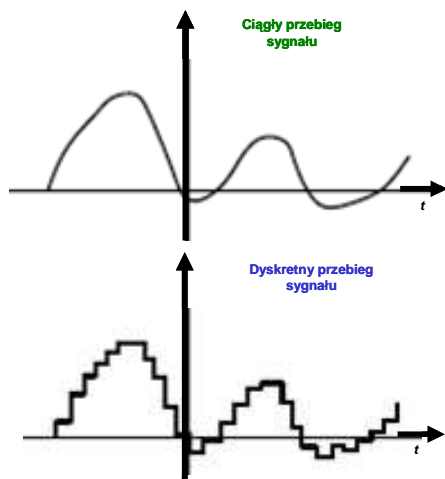
W **układach regulacji stałowartościowej** wartość zadana jest stała w długim okresie czasu. Zadaniem układu regulacji jest minimalizacja oddziaływania na obiekt regulacji występujących zakłóceń. Natomiast w przypadku **układów regulacji nadążnej** wielkość zadana nie jest stała w czasie i może się zmieniać w sposób z góry nieprzewidziany (jest nieznaną funkcją czasu). Zadaniem urządzenia regulacyjnego jest możliwie dokładne odwzorowanie przebiegu czasowego wielkości zadanej na wyjściu obiektu (wielkości regulowanej).

W układach regulacji występuje wiele wymagań, które mogą być silnie uzależnione od realizowanego zadania. Oprócz tego są także wymagania dotyczące większości układów. W tab.1.2 zestawiono ważniejsze wymagania dotyczące układów regulacji.

2. Sygnały i ich transmisja

2.1. Sygnały

Podstawą działania wyrobów mechatronicznych są sygnały. **Sygnał** jest to dowolna wielkość fizyczna występująca (przebiegająca) w czasie, która służy do przekazywania informacji. Czyli sygnał jest nośnikiem informacji (np. temperatura, ciśnienie, napięcie, prąd, droga, prędkość itp.). Fizyczna wielkość nazywana jest parametrem informacyjnym. Zarówno parametr informacyjny jak i przebieg czasowy sygnału mogą być ciągle lub dyskretne (rys.2.1).



Rys. 2.1 Sygnał ciągły i dyskretny

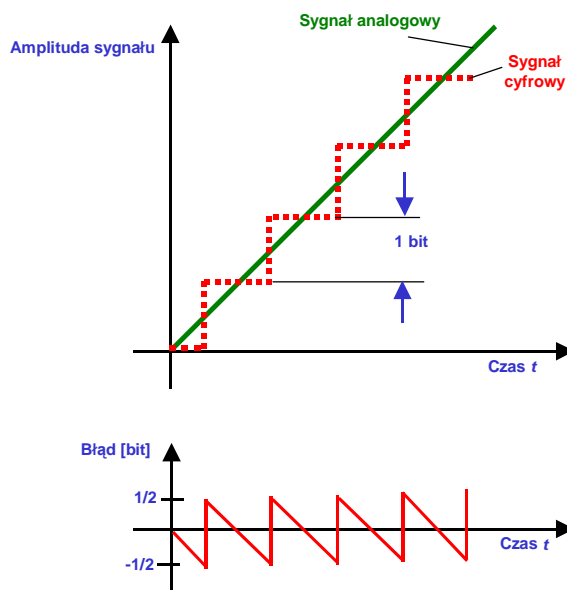
Sygnały, w zależności od ich wartości i przebiegu czasowego, można podzielić na różne rodzaje. I tak np. mogą być sygnały ciągłe i dyskretne, a także analogowe i cyfrowe (w tym binarne). W sygnałach analogowych zakres wartości może się zmieniać w sposób ciągły.

W obecnie produkowanych systemach mechatronicznych coraz więcej urządzeń pracuje w sposób cyfrowy. Komputerowe sterowniki wraz z sensorami i aktuatorami wypierają wcześniej stosowane urządzenia analogowe. Jest to spowodowane postępem technologicznym i korzyściami wynikającymi z techniki cyfrowej. Również transmisja cyfrowa wypiera standardowe sygnały analogowe, takie jak np.: 0 do 10 V, -5 do +5 V, lub 4 mA do 20 mA.

W technice cyfrowej nie pracuje się z sygnałami o przebiegu ciągłym, lecz z informacjami kodowanymi w dyskretne wartości sygnałów. Jeżeli w sygnale cyfrowym rozróżnia się tylko dwa stany, to wtedy jest to sygnał **binarny**. Pojedynczy znak binarny jest określany jako **bit** (skrót pochodzi z języka angielskiego - *binary digit*).

Sygnał binarny ze swoimi tylko dwoma różnymi stanami, w porównaniu z sygnałem analogowym, ma bardzo małą zawartość informacji. Jeżeli obrazowana w postaci cyfrowej wielkość wymaga większego zakresu wartości, to musi być ona zapisana za pomocą wielu bitów (bajty, słowa).

Aby można było wielkości (sygnały) analogowe przetwarzać w sposób cyfrowy, muszą być one najpierw zamienione na wartości cyfrowe. Ponieważ jednak wielkość analogowa może przyjmować dowolnie wiele wartości pośrednich, a zakres wartości wielkości cyfrowej jest ograniczony, to wskutek tej zamiany (przetwarzania) na dyskretne wartości cyfrowe powstają błędy kwantyzacji. Im więcej bitów zostanie wykorzystanych do tego zobrazowania i im częściej próbkowany jest sygnał analogowy, tym te błędy są mniejsze (rys.2.2). Ze wzrostem liczby bitów rosną jednak nakłady związane z przetwarzaniem i transmisją danych. Aby zapewnić możliwie małą utratę informacji powstającą wskutek przetwarzania analogowo-cyfrowego A/C i równocześnie nie wybierać niepotrzebnie dużego zakresu zobrazowania binarnego, zakres wartości należy dopasować do każdorazowego zadania.



Rys. 2.2 Przetwarzanie sygnału analogowego na cyfrowy

Cechami techniki analogowej są:

- jest ona tania (np. realizacja układów cyfrowych z elementami dyskretnymi wymaga większych nakładów niż odpowiedni układ analogowy),
- często jest prostsza,
- dla jednakowej transmisji sygnał analogowy ma mniejsze wymagania dla kanału niż sygnał cyfrowy,
- występuje ciągłe przetwarzanie amplitudowe i w czasie,
- często nie jest wymagane przekształcanie przetwarzanej wielkości,
- jest zwarta, również przy przekroczeniu wyspecyfikowanych zakresów sygnału.

Natomiast zalety techniki cyfrowej są następujące:

- jest tania przy zastosowaniu układów o wysokiej skali integracji,
- możliwa jest dowolna dokładność,
- duża odporność na zakłócenia i niezawodność,
- sygnały są możliwe do zapamiętania.

Cyfrowe zobrazowanie i przetwarzanie informacji, w porównaniu ze zobrazowaniem analogowym, wydaje się początkowo rozwiązaniem wymagającym znacznych nakładów. Każda wielkość analogowa musi być najpierw w odpowiedni sposób zakodowana, aby mogła być zapisana w postaci wielu sygnałów binarnych.

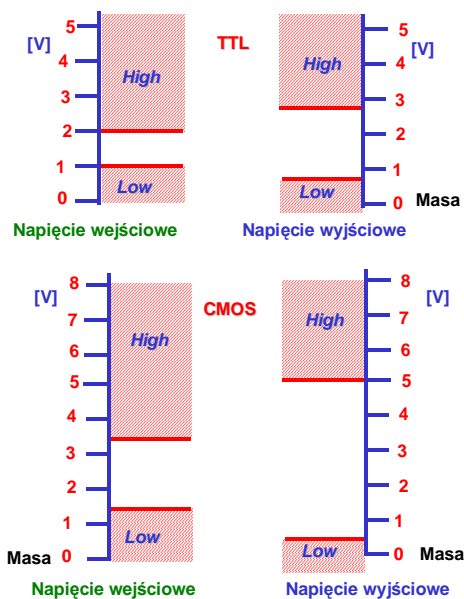
Jednak pozorne wady, które powstają wskutek takiego postępowania są w wielu obszarach zastosowań kompensowane przez takie zalety techniki cyfrowej jak:

- duża odporność na zakłócenia,
- możliwe proste zapamiętywanie danych,
- elastyczne dalsze przetwarzanie oraz
- różnorodne możliwości przesyłania (transmisji).

W układach cyfrowych (TTL-LS) stosowane są następujące poziomy sygnałów (napięcie):

- **poziom niski „0” L (LOW):**
 - gwarantowany poziom nadawania: **max. 0,5 V**
 - gwarantowany poziom odbierania: **max. 0,8 V**
 - statyczny odstęp od zakłóceń: **0,3 V**
- **poziom wysoki „1” H (HIGH):**
 - gwarantowany poziom nadawania: **min. 2,7 V**
 - gwarantowany poziom odbierania: **min. 2,0 V**
 - statyczny odstęp od zakłóceń: **0,7 V**

Na rys.2.3 pokazano poziomy sygnałów w układach cyfrowych TTL (ang. *Transistor-Transistor Logic*) i CMOS (ang. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*), natomiast w tab.2.1 zestawiono wartości ich parametrów.



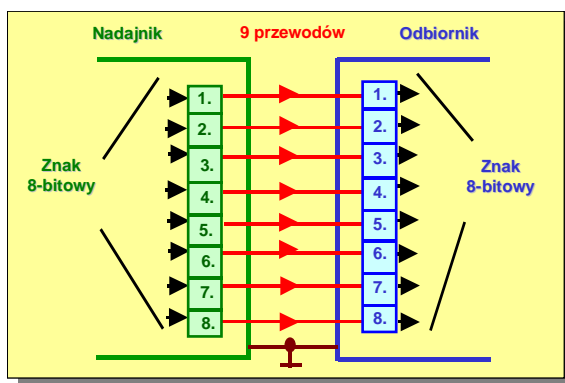
Rys. 2.3 Ogólne własności układów TTL i CMOS

Tab. 2.1 Parametry cyfrowych układów TTL i CMOS [1]

		TTL		CMOS	
Napięcie zasilania		4,75–5,25V		5–15 V	
Maksymalny prąd		100 mA		0,02 mA	
		Wejście	Wyjście	Wejście	Wyjście
Stan 0 (<i>Low</i>)	Napięcie	0,8 V	0,5 V	1,5 V	0,05 V
	Prąd	0,4 mA	8 mA	0,0001 mA	0,5 mA
Stan 1 (<i>High</i>)	Napięcie	2,0 V	2,7 V	3,5 V	4,95 V
	Prąd	0,02 mA	0,4 mA	0,0001 mA	0,02 mA
Maks. częstotliwość		33 MHz		10 MHz	
Aktywny pobór mocy		8 mW		0,1 mW	

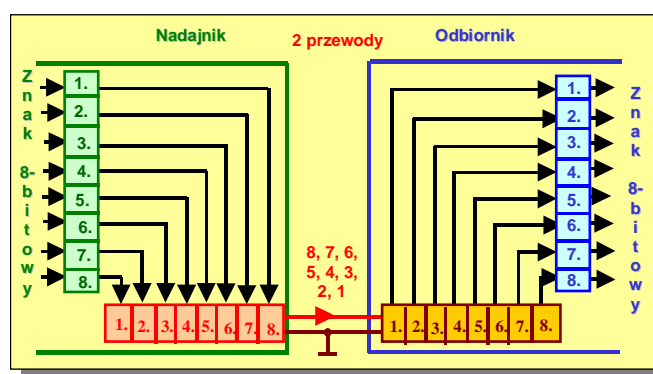
2. 2 Transmisja sygnałów cyfrowych

Transmisja sygnałów cyfrowych pomiędzy dwoma lub wieloma urządzeniami lub uczestnikami (stacjami, węzłami) komunikacyjnymi może się odbywać albo równolegle albo szeregowo.



Rys. 2.4 Transmisja równoległa

W **transmisji równoległej** wszystkie bity określonej informacji (danych) są przenoszone równocześnie (rys.2.4), tzn. równoległe przez odpowiednią liczbę przewodów danych (magistralę). Nakłady instalacyjne są tutaj odpowiednio wysokie i do zaakceptowania tylko w przypadkach krótkich dróg (odległości) transmisji. Do transmisji jednego bajta (tzn. 8-bitów) pomiędzy stacją nadawczą i odbiorczą wymagane jest minimum 9 przewodów (8 bitów i potencjał odniesienia). Dlatego też ta technika jest stosowana prawie wyłącznie w magistralach urządzeń. Są tutaj – przy krótkich połączeniach – bez zaawansowanych metod przetwarzania uzyskiwane wysokie szybkości transmisji. Zatem transmisja równoległa polega na jednoczesnym przesyłaniu większej liczby bitów informacji (przeważnie ośmiu, czyli jednego bajtu). Przykładem tego rozwiązania jest transmisja znaków do drukarki za pomocą kabla typu Centronics.



Rys. 2.5 Transmisja równoległa

Natomiast w przypadku dużych odległości zalecana jest **transmisja szeregowo**, w której tylko przez jeden przewód danych poszczególne bity są kolejno przenoszone (transmitowane) w czasie (rys.2.5). Chociaż ten sposób transmisji informacji jest związany z odpowiednio większymi nakładami czasu, to ze względu na znacznie mniejsze nakłady instalacyjne i koszty jest on często stosowany. Ponieważ wszystkie

informacje (bity) muszą być tworzone co najmniej równoległe, to nadajnik musi realizować równoległo-szeregowe, a odbiornik szeregowo-równoległe przetwarzanie danych. Te funkcje są realizowane przez specjalnie włączone rejestry przesuwne, które są już zintegrowane w dostępnych na rynku mikrokontrolerach i modułach komunikacyjnych. Zatem transmisja szeregową polega na przesłaniu sekwencyjnym (bit po bicie) danych. Urządzeniem transmisji szeregową może być np. modem. Dane są przesyłane za pomocą kabla szeregowego (np. RS-232) łączącego np. komputer z modemem, a stamtąd, po modulacji bit po bicie są przesyłane do sieci telefonicznej.

Szybkość transmisji określa natomiast liczbę bitów przesyłanych w jednostce czasu. Jednostką szybkości transmisji jest bit na sekundę (bit/s). Transmisja danych cyfrowych z jednego miejsca do drugiego może spowodować powstanie błędów. Mogą one wynikać z tego, że odbiornik z powodu działania zakłóceń sygnałów elektrycznych podczas transmisji nie odbiera tego samego sygnału, który został wysłany przez nadajnik. Impuls zakłócający może niekiedy w określonym punkcie być wystarczająco duży, żeby spowodować zmianę logicznego poziomu sygnału. I tak np. wysłany ciąg 1001 bitów może być odebrany jako 1101. Aby rozpoznać tego rodzaju błędy, często stosowany jest **bit parzystości**. Bit parzystości jest dodatkowym bitem 0 lub 1, który jest przyporządkowywany jednej grupie kodowej. W **prostej metodzie parzystości** wartość tego bitu jest dobierana w taki sposób, żeby całkowita liczba jedynek w grupie kodowej, łącznie z bitem parzystości, była liczbą parzystą. I tak np. podczas transmisji 1001 bit parzystości wynosi 0, a w wyniku otrzymuje się 01001 i tym samym liczba jedynek jest parzysta. Natomiast podczas transmisji 1101 wartość bitu parzystości wynosi 1, a wynik 11101 i tym samym łączna liczba jedynek jest parzysta. Natomiast w przypadku zastosowania **nieparzystości**, wartość bitu parzystości jest dobierana w taki sposób, żeby całkowita liczba jedynek, łącznie z bitem parzystości, była liczbą nieparzystą. Jeżeli w odbiorniku liczba jedynek w grupie kodowej nie daje wymaganej parzystości, to odbiornik rozpoznaje, że wystąpił błąd i może zażądać ponownej transmisji.

Rozszerzeniem kontroli parzystości jest **suma kontrolna**, w której bloki kodowe mogą być sprawdzane w taki sposób, że transmitowanych jest szereg bitów, które tworzą sumę binarną. Sprawdzanie parzystości i sumy kontrolnej pozwala tylko na rozpoznanie pojedynczych błędów w kodowanych blokach, natomiast podwójne błędy nie są wykrywane. Dlatego też konieczny jest rozwój i zastosowanie innych metod wykrywania i usuwania błędów transmisji.

Istnieje wiele metod rozpoznawania błędów w systemach pomiarowych, sterowania i komunikacyjnych (transmisji danych) [1].

Kontrola powtórzenia – ta metoda polega na kopiowaniu wzgl. powtórzeniu działania i porównaniu wyników. Jeżeli nie wystąpi błąd, to przyjmuje się, że wyniki powinny być jednakowe. W przypadku krótkotrwałych błędów może to oznaczać, że przebieg musi być dwukrotnie powtórzony i porównane wyniki, albo też zastosowane dwa układy i porównane wyniki obu tych układów. Jednak jest to rozwiązanie kosztowne.

Sprawdzanie wartości oczekiwanej – błędy programowe są często wykrywane wówczas, gdy nastąpi sprawdzenie, czy przy wprowadzaniu określonej danej numerycznej uzyskiwana jest wartość oczekiwana. Jeżeli nie uzyskuje się oczekiwanej wartości, to stwierdza się błąd.

Sprawdzanie czasu – w tej metodzie sprawdza się, czy w ściśle określonym czasie została wykonana przewidziana funkcja. Tego rodzaju kontrolę nazywa się zwykle nadzorowaniem czasu przebiegu (ang. *Watchdog Timer*). I tak np. w sterownikach swobodnie programowalnych PLC (ang. *Programmable Logical Controller*) na

początku operacji (cyklu) uruchamiany jest zegar (ang. *Timer*) i jeżeli operacja nie zostanie zakończona w przeciągu zadanego czasu, to przyjmuje się, że wystąpił błąd. Wówczas *Watchdog Timer* reaguje w ten sposób, że powoduje wywołanie alarmu i wyłączenie całej instalacji lub jej części.

Kontrola zwracania. Jeżeli istnieje bezpośrednia relacja pomiędzy wartościami wejściowymi i wyjściowymi, to przy pomocy wartości wyjściowej można obliczyć wartość wejściową, która spowodowała tę wartość wyjściową. Następnie otrzymaną wartość można porównać z wartością wejściową.

Kontrola parzystości i rozpoznawanie błędów – te metody sprawdzania są często stosowane do stwierdzania błędów pamięci i transmisji danych. Kanały komunikacyjne są często narażone na zakłócenia, które mogą wpływać na błędy nadawania. Aby stwierdzić, czy dane nie zostały zafałszowane, do przesyłanych danych jest wstawiany bit parzystości. Bit parzystości jest dobierany w taki sposób, żeby suma jedynek w grupie była parzysta (sprawdzanie parzystości) lub nieparzysta (sprawdzanie nieparzystości). W przypadku nieparzystości można po transmisji sprawdzić słowo, aby stwierdzić czy jest ono ciągle jeszcze nieparzyste. Inne metody kontroli zawierają kody, na których opiera się transmisja danych, aby rozpoznać zafałszowane bity.

Kontrola diagnostyczna – jest stosowana do sprawdzania przebiegu (zachowania się) składowych systemu. Do składnika wprowadzane są wielkości wejściowe, a uzyskiwane wielkości wyjściowe są porównywane z oczekiwanymi wynikami.

Istnieją różne możliwości przyłączenia (interfejsów) urządzeń automatyki. W wielu systemach automatyzacji stosowane są rozwiązania zapewniające integrację przepływu informacji z wykorzystaniem sieci komunikacyjnych (np. Ethernet). W poszczególnych urządzeniach lub małych modułach, a także programowaniu i pielęgnacji, w zależności od realizowanych zadań, są stosowane również inne rodzaje interfejsów (magistral, sieci).

2. 3 Interfejsy komunikacyjne

Magistrala **PCI** jest systemem łączącym moduły wewnątrz komputera PC. Z jej pomocą pracują wbudowane w komputer urządzenia (karty).

Interfejs sieciowy **Ethernet** umożliwia przyłączenie dowolnie wielu urządzeń przy pomocy standardowych metod. W dużych, silnie obciążonych sieciach nie można zapewnić określonego czasu transmisji.

Interfejs szeregowy (V.24, RS 232, COM) jest już nieco przestarzałym, ale bardzo rozpowszechnionym interfejsem, którego nie może ignorować żaden użytkownik.

Szeregowy interfejs RS-485 jest prosty, odporny na zakłócenia i uniwersalny w zastosowaniach. Tworzy on podstawę wszystkich systemów sieci miejscowych (ang. *Fieldbus*), ale niestety nie jest standardowo przewidziany prawie w żadnym komputerze. Pracuje on z przetwornikiem interfejsu.

Interfejs USB (ang. *Universal Serial Bus*) jest wielostronny, szybki i samo-konfigurujący się, tak że nadaje się on szczególnie dobrze dla ciągle wymienianych urządzeń.

Firewire (iLink, IEEE 1392) jest odpowiedni szczególnie dla szybkich aplikacji (video, przetwarzanie obrazów, szybkie pomiary).

Magistrala IEC (GPIB, IEC-625, IEEE-488) znajduje zastosowanie przede wszystkim w laboratoryjnej technice pomiarowej. Dysponuje ona takimi funkcjami,

które ułatwiają sterowanie urządzeniami pomiarowymi (*Trigger*, wywoływanie użytkownika, globalne informacje).

Interfejs na światło podczerwone **IrDa** umożliwia pracę bezprzewodową na małe odległości. Jest on stosowany często w przenośnych urządzeniach do programowania i testowania. W tab.2.2 zestawiono cechy standardowych interfejsów komunikacyjnych.

Tab. 2.2 Własności standardowych interfejsów komunikacyjnych [2]

	Interfejsy szeregowo				Interfejs równoległy
	TTY (20 mA)	RS232 (V.24)	RS422	RS485	IEEE488
Stany sygnału 0/ 1	20 mA/ 0 mA	+3 V / -3 V	+3 V / -3 V	+3 V / -3 V	5 V/ 0 V
		+15 V/ -15 V	+5 V/ - 5 V	+5 V/ - 5 V	
Możliwe rodzaje transmisji	Asynchroniczna, pełny duplex	Asynchroniczna, pełny duplex	Asynchroniczna, pełny duplex	Asynchroniczna, pełny duplex	Asynchroniczna, pełny duplex
Maksymalna długość przewodów	1000 m	30 m	1200 m	1200 m	2–30 m
Liczba przewodów	4	Min. 3: 2 - dane, 1 - masa	4 (5): 2 - nadawanie, 2 - odbieranie (1- masa)	2 (3): 2 - dane, 1 - masa	16: 8 - dane, 3 – <i>Handshake</i> 5 - kontrola
Liczba uczestników dla interfejsu	1/1	1/1	1/10		1/15
Nadajnik/ odbiornik				Nadajnik/ odbiornik	
Maksymalna szybkość transmisji	19,2 kbit/s	19,2 kbit/s	10 Mbit/s		2 Mbit/s
Zastosowania	Urządzenia pomiarowe	Urządzenia peryferyjne PC i do automatyzacji	Urządzenia peryferyjne PC i do automatyzacji	Urządzenia peryferyjne PC. Sieci <i>Fieldbus</i>	Urządzenia peryferyjne PC
Własności	Nieczuły na zakłócenia, z magistralą, niezawodna transmisja danych	Nieczuły na zakłócenia, z magistralą, niezawodna transmisja danych	Nieczuły na zakłócenia, z magistralą, niezawodna transmisja danych	Nieczuły na zakłócenia, z magistralą, niezawodna transmisja danych	Nieczuły na zakłócenia, bardzo szybki

3. Sensory

3.1. Wstęp

Istotnym składnikiem systemów mechatronicznych są **sensory**, tzn. urządzenia przeznaczone do pomiaru wielkości fizycznych określających stan zespołów lub procesów w tych systemach. Sensory są odpowiednikiem zmysłów w układach technicznych.

Sygnaly elektryczne z elementów czujnikowych (sensorów) są dostarczane dalej do urządzeń przetwarzających (sterowników, regulatorów, komputerów itp.), lub też przekazywane jako dane np. przez sieć komunikacyjną. W zależności od rodzaju sygnałów rozróżnia się następujące wejścia tych urządzeń:

- wejścia analogowe,
- wejścia cyfrowe (w tym binarne),
- wejścia licznikowe lub wejścia impulsowe.

Wejścia analogowe. Oprócz mierzonej wielkości (napięcie, prąd, oporność, ładunek, pojemność) należy również uwzględnić możliwe zakresy pomiarowe, oporność wewnętrzną (własną), czułość, rozdzielczość i dokładność. Jeżeli stosowane są czujniki z jednostką przetwarzającą, to uzyskiwane sygnały standardowe można wykorzystać w różnych urządzeniach.

Wejścia cyfrowe. Sygnaly cyfrowe są opisywane ich szerokością (= liczba bitów) i poziomem sygnału (0 V/ +10 V, TTL, CMOS, +/-12 V). Za pomocą jednego bita można np. określić stan przełącznika (inicjatora). Jeżeli wejście jest zorganizowane w byte (= 8 bit), to wartość sygnału przekazywana jest najczęściej jako liczba dziesiętna lub heksadecymalna..

Wejścia impulsowe. Jako impuls określa się krótkotrwałą zmianę pomiędzy dwoma stanami poziomu sygnału (napięcia). Wejście impulsowe reaguje na taką zmianę. Każdy impuls nadaje (zmienia) wartość liczbową wewnętrznego licznika. Należy uwzględnić niezbędną szybkość zmiany oraz to, czy licznik reaguje na zbocza dodatnie (narastanie) sygnału czy na zbocza ujemne (spadek), jak również maksymalnie dopuszczalną częstotliwość impulsów.

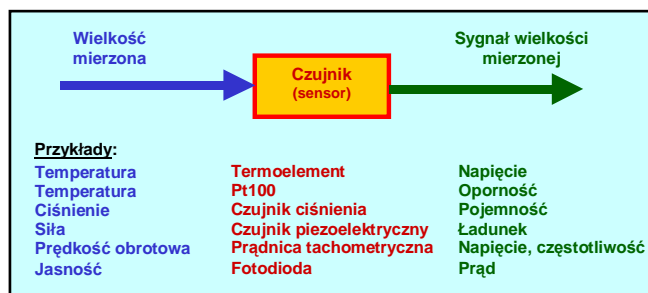
Wyraz „*sensor*” pochodzi od łacińskiego terminu „*sensus*” (czucie, wrażliwość) i określa technicznie czujnik, którego zadaniem jest uzyskiwanie informacji. Sensory dostarczają ważnych, mierzalnych informacji o procesie i tym samym stanowią podstawę do przetwarzania informacji. Zadaniem sensorów w systemach mechatronicznych jest pomiar istotnych, opisujących system fizycznych (nieelektrycznych) wielkości mierzonych i przetwarzanie ich na sygnały elektryczne. Uzyskiwane sygnały elektryczne pozostają przy tym z wielkościami mierzonymi w znanej, najczęściej liniowej zależności.

3.2 Budowa i rodzaje sensorów

Czujnik (sensor) jest zatem urządzeniem (rys.3.1), w którym **wielkość fizyczna** na wejściu jest **przetwarzana na elektryczną wielkość** na wyjściu.

Jeżeli pomiędzy wielkościami fizycznymi i wielkością elektryczną istnieje ścisła relacja (zależność), to wtedy za pomocą sensora można elektrycznie mierzyć różne wielkości fizyczne. Inne określenia czujnika to sensor, przetwornik pomiarowy i dajnik sygnału. Sensory (czujniki) przetwarzają mierzone wielkości fizyczne lub chemiczne w sygnały elektryczne. Uzyskiwany sygnał jest zależną od czasu fizyczną

lub chemiczną wielkością stanu (np. ciśnienie, temperatura, siła, itp.) służącą jako nośnik informacji.



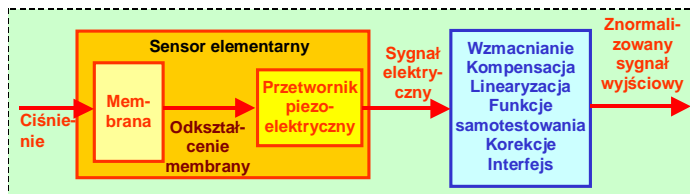
Rys. 3.1 Sensor

Funkcjonalnie sensor składa się z (rys.3.2): **elementu czujnikowego**, który zamienia wielkość mierzoną na sygnał elektryczny oraz układu **przetwarzania sygnału**, który dostarcza znormalizowanego **sygnału wyjściowego**.



Rys. 3.2 Budowa sensora

Na rys.3.3 pokazano przykład sensora ciśnienia. Układom elektronicznym do przetwarzania sygnałów stawia się wysokie wymagania. Realizują one zwykle następujące funkcje: wzmacnianie, linearyzacja, kompensacja temperatury, powiązanie sygnałów oraz przetwarzanie sygnału na postać analogową lub cyfrową.

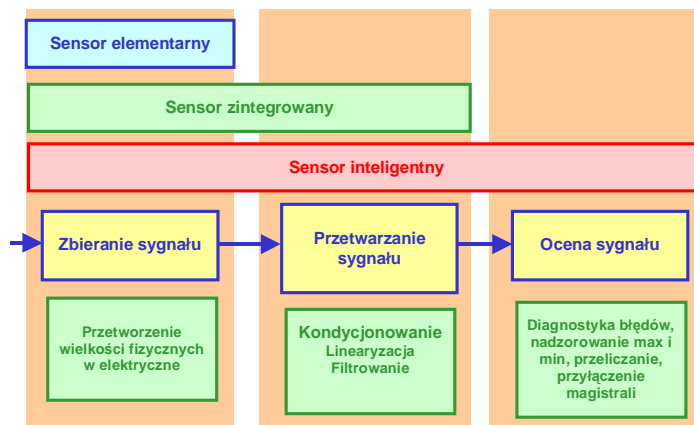


Rys. 3.3 Przykład sensora ciśnienia

Ze względu na szeroki zakres zastosowań sensorów, a szczególnie różnorodność mierzonych wielkości, są one różnie klasyfikowane. Podstawą klasyfikacji są mierzone wielkości, zasady działania sensorów, technologie wytwarzania, postacie sygnału, a także koszty.

W zależności od stopnia integracji elementu czujnikowego z przetwarzaniem sygnału rozróżnia się (rys.3.4):

- sensory elementarne (proste),
- sensory zintegrowane,
- sensory zaawansowane (inteligentne). Działanie sensorów jest oparte na różnych zasadach, w których wykorzystuje się wszelkiego rodzaju zjawiska fizyczne. W niektórych przypadkach bezpośredni pomiar danej wielkości jest bardzo utrudniony lub wręcz niemożliwy. Wówczas stosuje się pomiar wielkości pośredniej, która jest skutkiem działania wielkości mierzonej.



Rys. 3.4 Stopnie rozwoju sensorów

Przebieg przetwarzania sygnału w najbardziej rozbudowanym sensorze inteligentnym charakteryzują następujące etapy:

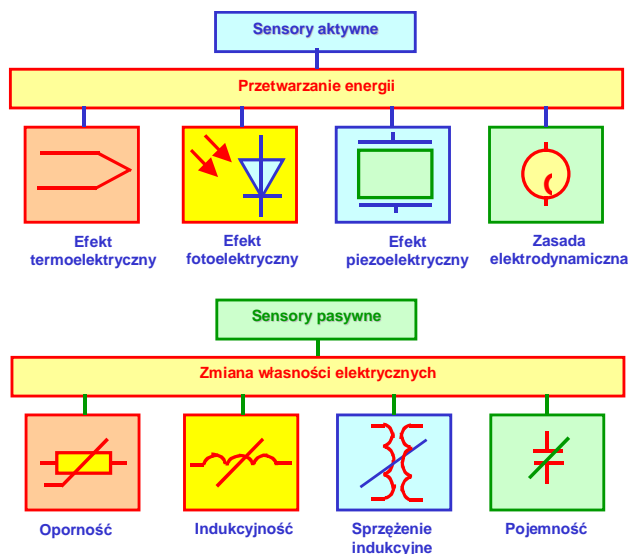
1. Przekształcanie sygnału mierzonej wielkości fizycznej w jedną z wielkości pośrednich (np. siły na odkształcenie).
2. Przetworzenie mechaniczno-elektryczne na sygnał elektryczny za pomocą elementu przetwornikowego, przy wykorzystaniu różnych zjawisk fizycznych (np. opór elektryczny, indukcyjność, piezoelektryczność). Przetworzenie elektrycznego sygnału za pomocą układu elektronicznego w celu: wzmocnienia sygnału, kompensacji wahań punktu zerowego (dryft zera), odfiltrowania sygnałów zakłócających, linearyzacji sygnału pomiarowego, dopasowania zakresu pomiarowego oraz normowania sygnału wyjściowego.
4. Przetworzenie analogowego sygnału pomiarowego na postać cyfrową za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego.
5. Zintegrowanie komputera w obudowie inteligentnego sensora pozwala na dalszą obróbkę sygnału pomiarowego w celu: nadzorowania danych pomiarowych, wyzwalania alarmów przy stanach granicznych sygnału, komunikacji z innymi urządzeniami (np. sterownikiem).

Ogólne wymagania dotyczące sensorów są następujące:

- jednoznaczne odwzorowanie wielkości wejściowej w wielkość wyjściową,
- nieczułość na oddziaływania innych czynników niż mierzona wielkość, w tym na zakłócenia elektromagnetyczne,
- liniowość charakterystyki pomiarowej,
- normalizacja sygnału wyjściowego (sygnały analogowe: 0 ... +5 V, -5 ... +5 V, -10 ... +10 V oraz pętla prądowa 0–20 mA lub 4–20 mA; sygnały cyfrowe z interfejsami: Centronics, RS232, RS485, lub systemy sieciowe: Profibus, Interbus, CAN, ASI, Ethernet),
- łatwe zasilanie prądem (np. +5 V, +24 V),
- możliwość kontroli sprawności działania (np. dioda świecąca, zdalne odpytywanie, własne nadzorowanie sensora). Sensory można klasyfikować wg różnych kryteriów. Takimi kryteriami mogą być np.:
- rodzaj mierzonej wielkości,
- wykorzystane zjawisko fizyczne,
- rodzaj sygnału wyjściowego,
- zakres pomiarowy,

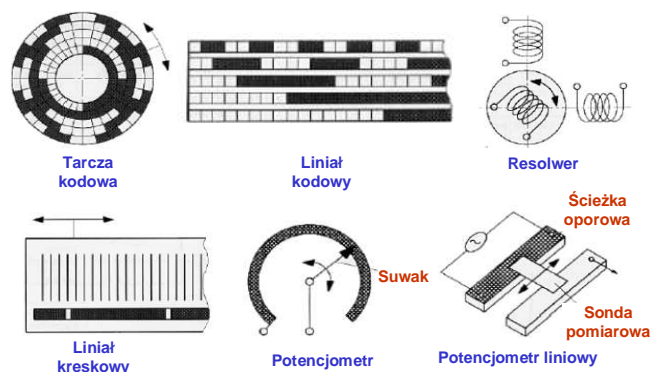
- rozdzielczość,
- wymiary, itp.

Sensory mogą pracować na zasadzie **stykowej** lub bez **stykowej** (rys.3.5) oraz mogą one być **czynne** (aktywne) lub **bierne** (pasywne) [2]. W sensorach aktywnych elektryczny sygnał wyjściowy powstaje bez dostarczania dodatkowej energii pomocniczej (zasilania) dzięki samemu działaniu wielkości mierzonej. Natomiast sensory bierne wymagają dostarczania dodatkowej energii, aby uzyskać z nich sygnał elektryczny. Sensory mogą mieć różną odporność na działanie warunków środowiska (mediów, zakłóceń, itp.).



Rys. 3.5 Sensory aktywne (czynne) i pasywne (bierne)

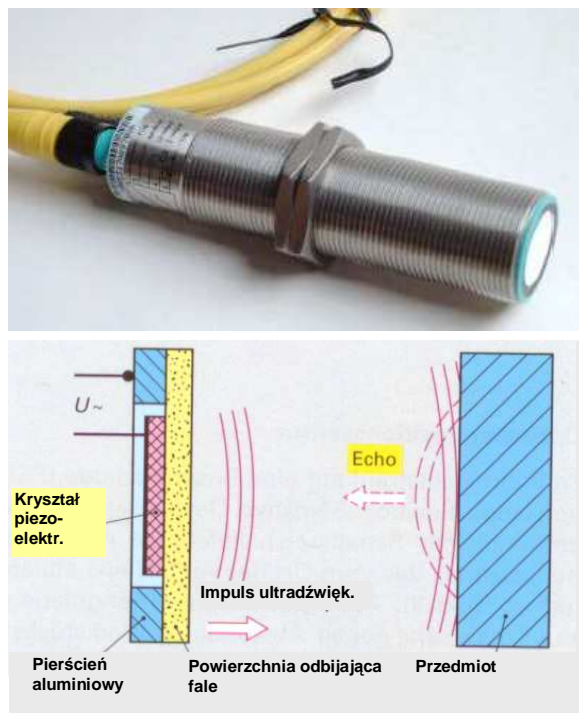
Aby na podstawie sygnałów wejściowych uzyskać sygnały wyjściowe, stosowane są różne zjawiska (efekty) fizyczne. Dlatego też rozróżnia się sensory: pojemnościowe, indukcyjne, rezystancyjne (oporowe), piezoelektryczne, magnetooporowe, termoelektryczne, piezoelektryczne, ultradźwiękowe, wykorzystujące zjawisko *Hall'a*, itd. Na rys.3.6 pokazano sensory przeznaczone do pomiaru położenia liniowego.



Rys. 3.6 Zasada budowy przetworników pomiaru położenia

Ultradźwiękowy czujnik odległości (rys.3.7) jest często stosowany np. do pomiaru poziomu paliwa w baku samochodów. Krótkie impulsy (niesłyszalne) dźwiękowe

z generatora (np. $f=150$ kHz) są wysyłane, odbijają się od powierzchni paliwa i są znowu odbierane przez czujnik. Na podstawie pomiaru czasu pomiędzy wysłaniem i odbiorem impulsu (czas przebiegu) jest określana odległość. Odbijająca powierzchnia powinna być możliwie gładka. Ciecze nadają się do tego bardzo dobrze, natomiast materiały sypkie często nie odbijają tak dobrze sygnałów ultradźwiękowych oraz powodują ich rozpraszanie w różnych kierunkach. Wartość mierzona zależy od prędkości rozchodzenia się dźwięku w medium (np. powietrze, para) pomiędzy czujnikiem i powierzchnią odbijającą falę ultradźwiękową i dlatego też jest ona również zależna np. od temperatury, ciśnienia i wilgotności. Ultradźwiękowe czujniki drogi są także stosowane do automatycznego pomiaru odległości w aparatach fotograficznych i kamerach (dalmierz), a także w układach do wspomagania parkowania w samochodach (sonary).



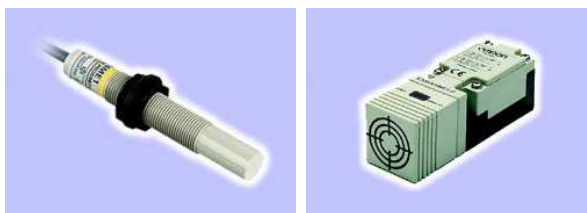
Rys. 3.7 Ultradźwiękowy czujnik odległości

Zalety sensorów ultradźwiękowych:

- wykrywają więcej rodzajów obiektów niż którykolwiek z innych (nieomal wszystko),
- mają duży zakres pomiaru odległości do ok. 10-m, a jest on większy niż dla czujników indukcyjnych i pojemnościowych,
- mają dużą trwałość, praktycznie nieskończona liczba cykli pracy,
- są odporne na trudne warunki środowiskowe,
- mają niską cenę. Natomiast ich wady to:
 - „martwa strefa” blisko czujnika – nie mogą wykrywać bliskich obiektów,
 - nie mogą wykrywać małych obiektów,
 - gładkie powierzchnie muszą być umieszczone prostopadle do czujnika, w przeciwnym razie echo nie wróci do niego,
 - niezbyt duża dokładność (0,1–2% zakresu pomiarowego).

Istotną rolę w systemach mechatronicznych odgrywają sensory binarne, które są czujnikami z dwustanowym wyjściem sygnałów (0/1), np. sygnał przełączenia ZAŁ/WYŁ, napięcie 0 V/ 10 V, prąd 0 mA/ 20 mA. Binarne czujniki mogą być urządzeniami elektromechanicznymi stykowymi, albo też bezstykowymi elektronicznymi czujnikami zbliżeniowymi. Cechą charakterystyczną czujników binarnych jest występowanie różnicy pomiędzy załączeniem i wyłączeniem (histereza).

Bezstykowe czujniki zbliżeniowe (pojemnościowe, indukcyjne, optyczne i ultradźwiękowe) mają elektronicznie sterowane wyjście sygnału i nie zawierają podlegających zużyciu ruchomych części mechanicznych (rys.3.8). Są one stosowane np. jako wyłączniki krańcowe w obrabiarkach, a także do zliczania przedmiotów na ruchomych taśmach.



Rys. 3.8 Indukcyjny i pojemnościowy czujnik zbliżeniowy

W pomiarach temperatury za pomocą termopar wykorzystywane jest zjawisko termoelektryczne (efekt Seebeck'a). Jeżeli rozgrzeje się miejsce styku dwóch różnych metali, to wtedy powstaje mierzalne, zależne od temperatury napięcie elektryczne. Ruchliwość elektronów w przewodnikach metalowych jest zależna zarówno od materiału jak i temperatury. Jeżeli dwa metale są ze sobą połączone dla przewodzenia, to wtedy elektrony z jednego metalu przechodzą do drugiego. Wskutek tego po jednej stronie powstaje nadmiar, a po drugiej niedobór elektronów. Wartość powstającego w ten sposób napięcia termoelektrycznego jest zależna od obu materiałów i temperatury.

3. 3 Wymagania i dobór sensorów oraz ich zastosowanie

Ze względu na dużą różnorodność sensorów konieczne jest przeprowadzenie ich klasyfikacji. Kryteriami klasyfikacji sensorów są:

- wielkości mierzone,
- zasada działania sensora,
- technologia wykonania,
- postaci sygnału i interfejsy,
- obszary zastosowania,
- własności i cechy charakterystyczne,
- klasy jakości,
- cena.

Ze względów aplikacyjnych ważny jest taki podział sensorów, w którym występują wielkości mierzone (mechaniczne, termiczne, elektryczne, chemiczne i fizyczne), dla których dobierana jest odpowiednia zasada działania sensora. W układach mechatronicznych szczególne znaczenie mają takie sensory, które mierzą wielkości mechaniczne lub termiczne.

Wielkości mierzone za pomocą czujników (sensorów) dostarczają informacji o stanie procesu lub zespołu maszyny (urządzenia). Ważnymi czynnikami, które należy uwzględnić przy doborze sensorów w określonych warunkach ich zastosowań są m.in.:

- dokładność,
- niezawodność i odporność na warunki środowiska,
- szybkość reakcji,
- wrażliwość na działanie innych (niż mierzone) czynników,
- zachowanie w czasie załączania oraz
- rozdzielczość.

W celu zapewnienia odporności sensora na działanie warunków otoczenia (środowiska) w którym jest on wykorzystywany, stosowane są odpowiednie wykonania jego obudowy, co jest określane jako stopień ochrony IP (ang. *International Protected*), np. IP56. Natomiast w przypadku pomiarów szybkozmiennych wielkości (np. ciśnienia w komorze spalania silnika spalinowego), sensor musi się odznaczać odpowiednimi własnościami dynamicznymi (pasmo przenoszenia).

Przy wyborze sensorów do określonej aplikacji należy uwzględnić szereg czynników takich jak [1]:

- rodzaj wymaganego pomiaru, np. wielkość mierzona, jej wartość znamionowa, zakres zmian wartości wielkości mierzonej, wymagana dokładność, wymagana szybkość pomiarów, wymagana niezawodność oraz warunki otoczenia w których przeprowadzane są pomiary,
- wymaganą postać wielkości wyjściowej (sygnału) z sensora, która określa wymagania dotyczące zadań przetwarzania sygnału,
- następnie można rozpatrywać sensory z uwzględnieniem takich czynników jak ich zakres działania, dokładność, liniowość, szybkość reakcji, niezawodność, trwałość, konieczność obsługi, wymagania dotyczące zasilania elektrycznego, zwartość budowy, dyspozycyjność i koszty.

Obszar zastosowania sensorów jest określony ich statycznymi i dynamicznymi własnościami (właściwościami pomiarowymi) oraz mechanicznymi, cieplnymi i chemicznymi czynnikami oddziałującymi. Ponadto, oprócz uwzględnienia aspektów technicznych, istotne znaczenie mają względy ekonomiczne.

W wyniku selekcji wielu sensorów dokonywany jest wybór jednego sensora, który spełnia minimalne wymagania zadania pomiarowego, przy uwzględnieniu aspektów technicznych i ekonomicznych. Dobór właściwego sensora dla układu mechatronicznego ma istotne znaczenie dla poprawności działania tego układu i uzyskiwanych efektów.

Doboru sensora dokonuje się w siedmiu następujących krokach:

1. Warunki pomiaru i ogólne wymagania dotyczące sensora oraz wpływ otoczenia i warunków ograniczających.
2. Określenie możliwych zasad działania sensora. Sprawdzenie własności pomiarowych wybranych zasad działania.
4. Sprawdzenie dopuszczalnych błędów wybranych zasad pomiaru wzgl. sensorów.
5. Sprawdzenie mocy sygnału sensora (moc elektryczna) wzgl. konieczności jego zasilania.
6. Sprawdzenie czynników ekonomicznych i innych.
7. Określenie typu sensora.

Krok 1: Warunki pomiaru i ogólne wymagania dotyczące sensora oraz wpływ otoczenia i warunków ograniczających

Postępowanie wykonywane w tym kroku ma na celu sprecyzowanie wymagań dotyczących sensora wzgl. układu pomiarowego. Dla każdego przypadku zastosowania (aplikacji) należy rozpatrzyć następujące aspekty:

- Gdzie będzie zastosowany sensor? Jak ciężkie są następstwa awarii sensora? (*odpowiedzialność producenta za produkt*) Jakie wielkości mają być mierzone? Czy wielkości mierzone mają charakter statyczny czy dynamiczny? Jak wysokie są wymagania dotyczące: powtarzalności, rozdzielczości, ustawiania punktu zerowego, minimalnej i maksymalnej częstości pomiarów? Jakie panują warunki otoczenia? (*temperatura, wilgotność, ciśnienie, przyspieszenie, materiały chemiczne, czystość, ...*)
- Czy występują elektryczne lub magnetyczne pola zakłócające? Jakiej wielkości i masy nie powinien przekraczać sensor? Jak duża powinna być trwałość sensora?
- Czy wskazana jest możliwość wymiany i kalibracji sensora? Jak sensor będzie włączony w cały system mechatroniczny?

Krok 2: Określenie możliwych zasad działania sensora

Z wymagań dotyczących sensora wynikają możliwe zasady jego działania. Możliwe rodzaje pomiaru dla sensora (fizyczne zasady jego działania) są silnie uzależnione od fizycznego charakteru wielkości mierzonej oraz spodziewanych czynników zakłócających.

Krok 3: Sprawdzenie własności pomiarowych wybranych zasad działania sensora

W tej fazie doboru sensora uwzględnia się następujące czynniki:

- zakres pomiarowy,
- maksymalną zmianę wielkości mierzonej,
- rozdzielczość sygnału pomiarowego,
- wartość progową (najmniejszy sygnał).

Krok 4: Sprawdzenie dopuszczalnych błędów wybranych zasad pomiaru względnie sensorów

Całkowity błąd sensora jest określony jego **własnościami statycznymi i dynamicznymi**, które należy sprawdzić. Własności statyczne takie jak: **nieliniowość, histereza, termiczny dryft zera oraz zmiany czułości spowodowane czynnikami termicznymi** określają dokładność statycznych i quasi statycznych pomiarów. Pomiaru statyczne wymagają dolnej częstotliwości granicznej 0 Hz, natomiast pomiaru quasi statyczne w zależności od dynamiki procesu wymagają dolnej częstotliwości granicznej kilku Hz. Statyczny błąd całkowity sensora w danych warunkach pomiaru nie może przekraczać określonej wartości (np. $\pm 5\%$ wartości końcowej zakresu pomiarowego). Sensory o dobrych własnościach pomiarowych, tzn. gdy czas nastawiania sensora jest znacznie mniejszy od czasu narastania sygnału, są wymagane dla szybkich dynamicznych przebiegów sygnałów. Dzięki temu sensor ma górną częstotliwość graniczną o wartości znacznie większej niż najwyższa częstotliwość składowej widmowej zawartej w sygnale. Dolna częstotliwość graniczna sensora ze względu na zawartość składowej stałej w sygnale powinna wynosić 0 Hz. Natomiast w przypadku pomiarów czysto dynamicznych wielkości można stosować sensory o dolnej częstotliwości granicznej wyższej od zera.

Krok 5: Sprawdzenie mocy sygnału sensora (moc elektryczna) względnie konieczności jego zasilania

W ramach oceny przeprowadzanej w tej fazie doboru sensora rozpatruje się potrzebę:

- elektronicznego wzmocnienia sygnału pomiarowego,

- ekranowania (kompatybilność elektromagnetyczna).

Krok 6: Sprawdzenie czynników ekonomicznych i innych aspektów dotyczących sensora

Następnie ocenia się następujące czynniki dotyczące wyboru sensora:

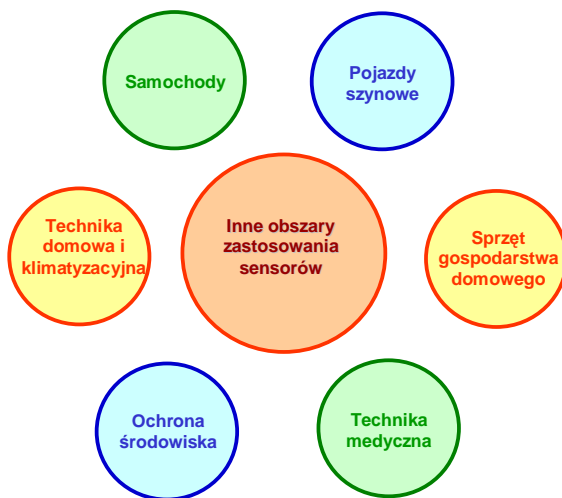
- koszt zakupu/ wykonania sensora, nakłady związane z pielęgnacją, bezpieczeństwo pracy, niezawodność,
- trwałość (żywoćność).

Krok 7: Określenie typu sensora

Na zakończenie procesu doboru sensora dokonuje się wyboru konkretnego typu sensora, który zostanie zastosowany w budowanym układzie mechatronicznym.

Konwencjonalnymi obszarami zastosowania sensorów są (rys.3.9):

- automatyzacja,
- technika procesowa,
- robotyka,
- technika pomiarowa,
- technika sterowania i regulacji.



Rys. 3.9 Obszary zastosowania sensorów

Jednak wraz z rosnącą miniaturyzacją sensorów są one coraz częściej stosowane także w innych obszarach, takich jak np. medycyna i ochrona środowiska.

4. Aktuatory

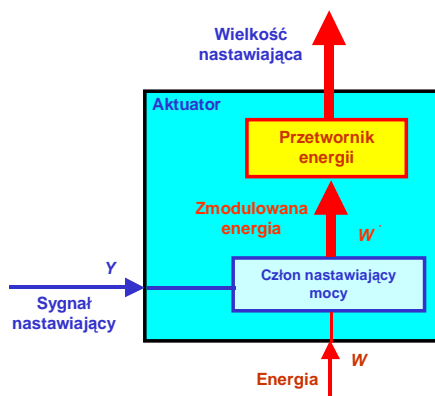
4.1 Wstęp

Aktuatory (człony wykonawcze) są ważnymi składnikami układów mechatronicznych. Porównując aktuator z człowiekiem, to stanowi on mięśnie, które są niezbędne do wykonania ruchów lub uzyskania sił. Ich sterowanie odbywa się przez mózg (komputer procesowy), a ich zdolność funkcjonowania wymaga odpowiedniego przepływu krwi (energii pomocniczej).

Termin „**aktuator**” wywodzi się z łacińskiego wyrazu „*agitare*” oznaczającego poruszanie, napędzanie. Określa on urządzenie nastawiające (wykonawcze). Zadaniem aktuatorów jest zamiana wielkości nastawiających o małej mocy, przy wykorzystaniu dodatkowej energii, w wielkości fizyczne o znacznie wyższym poziomie energii, w celu oddziaływania na proces. Pojęcie aktuator zawiera wszystkie rodzaje urządzeń służących do wytwarzania sił i realizacji ruchów.

W systemach mechatronicznych aktuatory znajdują się pomiędzy przetwarzaniem informacji i oddziaływanym procesem. Są to w szczególności aktuatory z wejściem elektrycznym lub płynowym (pneumatycznym albo hydraulicznym) i mechanicznymi wielkościami wyjściowymi, takimi jak droga (przemieszczenie), siła lub prędkość. Ponadto występują również aktuatory z zupełnie innymi zasadami działania, takimi jak np. efekt piezoelektryczny.

Patrząc z technicznego punktu widzenia pod pojęciem aktuatora rozumie się zestawienie przetwornika energii z członem nastawiającym mocy. Człon nastawiający mocy łączy wchodzącą energię W (zwykle energię elektryczną) z sygnałem nastawiającym Y (rys.4.1). W ten sposób powstaje zmodulowana energia, która przez przetwornik jest transformowana w odpowiedni rodzaj energii wielkości nastawiającej (najczęściej energię mechaniczną). Zatem w układach mechatronicznych aktuatory stanowią człon łączący przetwarzanie informacji z mechanicznym układem podstawowym.



Rys. 4.1 Zasada działania aktuatora

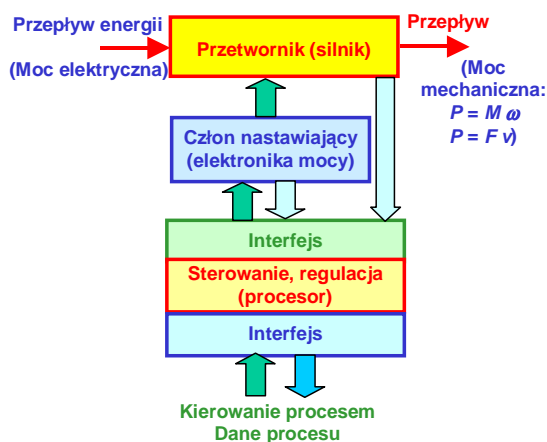
Właściwości aktuatorów istotnie wpływają na wydajność i gotowość całego urządzenia mechatronicznego. Dlatego aktuatory zaczynają zajmować kluczową pozycję np. we wszystkich obszarach nowoczesnej automatyzacji procesów. Optymalizacja dotychczasowych oraz realizacja nowych funkcji sterowniczych i regulacyjnych wymaga szerszego zastosowania lepszych i tańszych aktuatorów. Dotyczy to szczególnie zadań nastawczych w układach napędowych najróżnorodniejszych maszyn i urządzeń, charakteryzujących się wysokimi

wymaganiami w ekstremalnych warunkach pracy. Przy tym nie chodzi tylko o dobre własności dynamiczne, czyli wykonywanie szybkich i dokładnie pozycjonujących ruchów nastawczych. Na pierwszy plan wychodzą coraz częściej wymagania systemowe. Chodzi tu o zwarte jednostki funkcjonalne, które można łatwo dopasowywać do zmieniających się zadań. Nowoczesny akuator powinien ponadto ułatwiać nadzór i diagnozę, zarówno siebie samego jak i całego urządzenia mechatronicznego.

Konwencjonalne (mechaniczno-elektryczne) urządzenia nastawcze nie spełniają zwykle powyższych wymagań. Ich jakość funkcjonowania opiera się jeszcze w dużym stopniu na precyzji części (małych tolerancjach wykonania). Dlatego przechodzi się dziś do mechatronicznych systemów nastawczych. W miejsce dotychczas stosowanej kombinacji precyzyjnej mechaniki i prostego przetwarzania sygnału pojawiają się aktuatory „inteligentne”. Ich obszar funkcji jest rozszerzany przez intensywne, cyfrowe przetwarzanie informacji. Zatem istotnym elementem aktuatora staje się oprogramowanie. Obejmuje ono zarówno algorytm zdolny pracować w czasie rzeczywistym jak i sposób projektowania regulatora.

Urządzenia mikroprocesorowe (komputerowe) są coraz tańsze. Wymagana wydajność obliczeniowa czy komunikacyjna jest łatwa do uzyskania. Opracowuje się nowe algorytmy regulacji i poprawia istniejące. Opierają się one na odpowiednich modelach aktuatora i skuteczniej wykorzystują fizyczne właściwości napędów nastawczych. Ponadto kompensują takie czynniki jak: tolerancje wykonania, wahania warunków pracy, naturalne zjawiska zużycia. Trwała, wysoka dokładność pozycjonowania i duża dynamika nastawiania mogą być wtedy osiągnięte przy prostej budowie aktuatora. Dodatkowo okazuje się, że dostępne sygnały pomiarowe można zastosować do nadzoru i diagnozy urządzenia nastawczego i to bez dodatkowych pomiarów.

Aktuatory służą do sterowania przepływem energii i strumieni mas w procesach (siły, momenty, prędkości liniowe, prędkości obrotowe). Ich sterowanie i regulacja odbywa się najczęściej za pomocą sygnałów elektrycznych małej mocy, które są tworzone przez procesory (mikrosterowniki lub procesory sygnałowe). Ogólnie aktuatory spełniają funkcję podstawową jaką jest „zamiana i nastawianie strumieni energii”. W najprostszymi zastosowaniach ich funkcja ogranicza się do zamiany energii. I tak np. silniki elektryczne zamieniają strumień energii elektrycznej na energię mechaniczną.



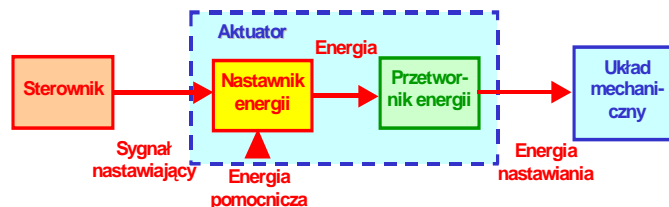
Rys. 4.2 Akuator mechatroniczny

Obserwuje się rosnące zastosowanie układów napędowych (silników elektrycznych) małej mocy. Ich wbudowywanie, konfiguracja i uruchamianie są uproszczone dzięki sieciowym systemom komunikacyjnym z prostymi interfejsami (rys.4.2). Coraz większe znaczenie ma także miniaturyzacja aktuatorów i składników napędów.

Rozwój mikroelektroniki prowadzi do coraz większej mocy obliczeniowej z mniejszej przestrzeni i umożliwia coraz szybsze i dokładniejsze wykonywanie zadań przetwarzania i nastawiania energii w procesach. Integracja układów cyfrowych i analogowych w jednym module MCM (ang. *Multi-Chip-Module*) umożliwia budowę złożonych zespołów o minimalnych wymiarach i z minimalną liczbą połączeń oraz wysoką niezawodnością. Istotny wpływ na rozwój aktuatorów ma także technika mikrosystemów, która umożliwia opracowanie wielu innowacyjnych rozwiązań.

4.2 Rodzaje aktuatorów

Oddziaływanie na procesy techniczne (zespoły robocze) odbywa się zwykle za pomocą urządzeń nastawiających (aktuatorów), które zmieniają określone wielkości wyjściowe (rys.4.3). Do tego celu jest najczęściej potrzebna energia pomocnicza: elektryczna, hydrauliczna lub pneumatyczna. Aktuatory są stosowane we wszystkich obszarach techniki. Ze względu na różnorodne wymagania występuje wiele ich rodzajów. Aktuatory dla systemów mechatronicznych mają zwykle elektryczne wielkości wejściowe i mechaniczne wielkości wyjściowe, takie jak np. droga (przeszyczenie), prędkość lub siła. Klasyfikację aktuatorów można przeprowadzić m.in. ze względu na rodzaj energii pomocniczej służącej do wytwarzania siły (ruchu).



Rys. 4.3 Rola aktuatora w systemie mechatronicznym

Wśród konwencjonalnych aktuatorów wyróżnia się:

- aktuatory elektromagnetyczne,
- aktuatory hydrauliczne,
- aktuatory pneumatyczne,
- aktuatory termiczne.

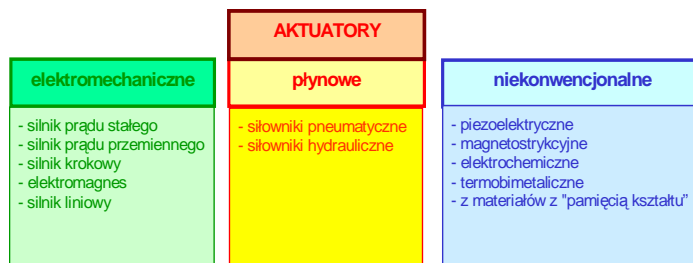
Zarówno w konwencjonalnej technice napędów jak również w aplikacjach mechatronicznych są przeważnie stosowane obrotowe maszyny elektryczne (silniki). Natomiast w robotyce, a także w maszynach technologicznych (np. obrabiarkach sterowanych numerycznie) są często stosowane serwo-silniki prądu stałego i przemiennego (z falownikami) oraz silniki krokowe ze względu na dobre możliwości regulacji położenia. W nowoczesnych układach napędowych jak również systemach mechatronicznych istotne znaczenie ma również technika płynowa. Układy hydrauliczne i pneumatyczne mają szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Aktuatory płynowe do realizacji ruchów i wytwarzania sił wykorzystują media w postaci cieczy (hydrauliczne) lub gazu (pneumatyczne). Media te mają energię kinetyczną lub potencjalną i dzięki temu są w stanie wykonać pracę w silniku

lub członie nastawiającym (np. siłowniku). Aktuatory płynowe bardzo dobrze nadają się do realizacji ruchów (przemieszczeń) liniowych. Dzięki ich prostej budowie mogą one zastępować wiele rozwiązań elektrycznych. Jednak za pomocą aktuatorów płynowych utrudniona jest realizacja dokładnych zadań pozycjonowania.

Elektryczność Energia elektryczna jest dostępna w większości przypadków. Jej bezproblemowe wytwarzanie ze stosunkowo wysoką sprawnością, w połączeniu z dobrymi możliwościami przesyłania i transformowania, daje dużą elastyczność. Ponadto, dzięki tanim układom półprzewodnikowym, jest zapewnione proste nastawianie strumieni energii. Realizacja przetwarzania sygnału i napędu odbywa się z wykorzystaniem jednakowej postaci energii, a często także z tym samym napięciem. Dlatego też układy elektryczne wypierają inne rozwiązania. Jedyne tam, gdzie nie jest to możliwe ze względu na duże wartości sił, wysokie temperatury lub ze względów bezpieczeństwa, w systemach mechatronicznych muszą być także stosowane inne rodzaje energii pomocniczej.

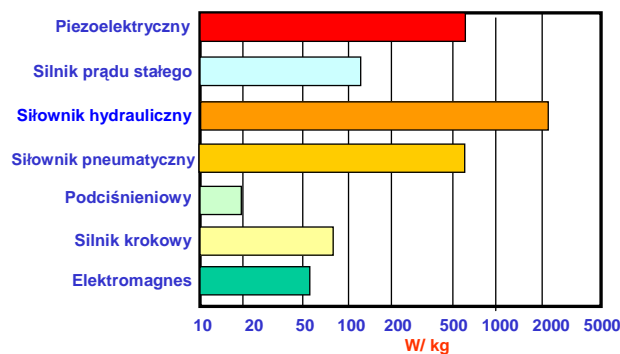
Hydraulika Strumień oleju pod ciśnieniem w obwodach hydraulicznych zwykle musi być wytwarzany przez dodatkowo zainstalowany zasilacz hydrauliczny. Ciśnienia robocze wynoszą od 100 do 400 bar. Zaletami układów hydraulicznych jest uzyskiwanie dużych wartości sił oraz zwarta budowa napędów.

Pneumatyka Układy pneumatyczne są realizowane zarówno na podciśnienie (szczególnie w samochodach ciężarowych), jak i na nadciśnienie (względem ciśnienia atmosferycznego). Wartości ciśnienia są zwykle ograniczone do 6-8 bar, a w automatyzacji procesów do 1,4 bar, co w porównaniu z układami hydraulicznymi prowadzi do dużych wymiarów (gabarytów) w tych przypadkach, gdy wymagane są większe wartości sił. Konieczne jest zwykle także uzdatnianie sprężonego powietrza. Napędy pneumatyczne charakteryzują się niezawodną i cichą pracą.



Rys. 4.4 Rodzaje aktuatorów

Na rys.4.4 pokazano rodzaje aktuatorów, a na rys.4.5 własności różnego rodzaju aktuatorów.



Rys. 4.5 Stosunek mocy [W] do masy [kg] dla typowych aktuatorów (bez uwzględnienia zasilania)

4. 2.1 Aktuatory elektryczne

W systemach mechatronicznych występuje duży udział aktuatorów elektromechanicznych. Ogólna budowa różnych silników elektrycznych i ich podstawowe własności są przyjmowane jako znane. W porównaniu z silnikami stosowanymi w maszynach w celu uzyskiwania sił, aktuatory elektromechaniczne w systemach mechatronicznych nie są przewidziane do pracy ciągłej i preferowanego kierunku obrotów, lecz służą one do nastawiania określonej pozycji. Wskutek tego występują inne wymagania, takie jak np. duża elektryczna i mechaniczna przeciążalność, wysoka dokładność pozycjonowania, dobre własności dynamiczne i związany z tym mały moment bezwładności, wytwarzanie momentu hamowania przy odporności na zużycie, a także szeroki zakres zmian prędkości obrotowej. Doprowadziło to do rozwoju specjalnych serwo-silników. Zakres mocy rozciąga się od małych silników o mocy kilku watów do napędów o mocy w kW.

W **aktuatorach elektromagnetycznych** przetwarzanie energii (mocy) elektrycznej w mechaniczną odbywa się z wykorzystaniem pola elektromagnetycznego. Aktuatory te dzielą się na:

- **aktuatory elektrodynamiczne** oraz
- **aktuatory reluktancyjne** (reluktancja – rezystancja magnetyczna).

Sposób działania aktuatorów elektrodynamicznych opiera się na sile Lorenz'a. Występuje ona wtedy, gdy przewodzący prąd elektryczny przewód znajduje się w polu magnetycznym, przy czym prąd elektryczny i pole magnetyczne muszą wykonywać względem siebie ruchy. Do aktuatorów elektrodynamicznych zaliczane są: **silniki prądu stałego** oraz **silniki prądu przemiennego**.

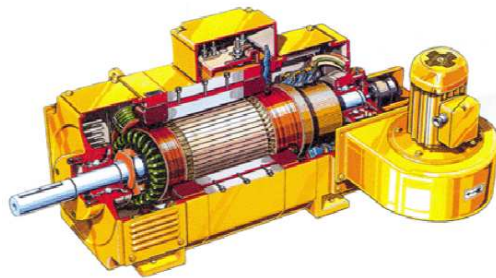
Silniki prądu stałego są obecnie często stosowanymi silnikami elektrycznymi o regulowanej prędkości obrotowej. Wynika to szczególnie z takich ich zalet jak:

- bezstopniowa możliwość regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie,
- wysoka sztywność napędu (małe zmiany prędkości obrotowej wskutek obciążenia, także w przypadku braku regulacji),
- równomierny bieg,
- wysokie własności dynamiczne.

Silnik prądu stałego zawiera stojan i wirnik. Składają się one z współosiowych ferromagnetycznych cylindrów, w których wnętrzach są umieszczone cewki. Jeżeli obie cewki, tzn. wirnika i stojana są zasilane prądem stałym, to wówczas otrzymuje się silnik prądu stałego. W zależności od rodzaju wzbudzenia pola magnetycznego stojana **silniki prądu stałego** dzieli się na:

- **obcowzbudne** - wzbudzenie odbywa się albo przez oddzielne napięcie w cewkach stojana albo jest to wzbudzenie stałe (magnesy trwałe),
- **samowzbudne**, przy czym rozróżnia się silniki bocznikowe i silniki szeregowo.

Silniki elektryczne prądu stałego z komutacją mechaniczną (ze szczotkami) do realizacji dynamicznych, szybkich zadań nastawiania i pozycjonowania są obecnie wykonywane prawie wyłącznie jako silniki bocznikowe z magnesami trwałymi (rys.4.6). Odznaczają się one liniową charakterystyką zależności prąd-moment obrotowy, która jest prawie niezależna od położenia kąтового wirnika. Kierunek obrotów i prędkość obrotową można w prosty sposób zmieniać bezstopniowo przez zmianę napięcia podawanego do wirnika. Uzyskuje się szeroki zakres zmian prędkości obrotowych aż do 1 : 10 000 oraz płynną pracę silnika. Dlatego też silniki prądu stałego dla standardowych zadań w obszarze małych i średnich mocy są także jeszcze obecnie dobrym i tanim rozwiązaniem.



Rys. 4.6 Silnik prądu stałego z komutacją mechaniczną

Zalety silników elektrycznych prądu stałego z komutacją mechaniczną:

- dobre przebiegi regulacji dzięki liniowej charakterystyce prąd-moment obrotowy,
- dobre własności dynamiczne,
- bardzo wysoka płynność ruchu,
- duży zakres zmian prędkości obrotowej.

Natomiast ich wady to:

- zużycie komutatora i szczotek (obsługa),
- ograniczenie dynamiki i momentu zatrzymania wskutek komutatora,
- złe odprowadzanie ciepła.

Jeszcze do niedawna w wysoko-dynamicznych serwonapędach były stosowane przeważnie silniki prądu stałego z komutacją mechaniczną. Obecnie w zakresie małych i średnich mocy napędów są one coraz częściej zastępowane przez **silniki bezszczotkowe** (synchroniczne serwo-silniki). Ich zaletami są m.in. praca bezobsługowa i duża przeciążalność silnika ze względu na brak mechanicznego układu komutacyjnego. Dalszą zaletą silników bezszczotkowych jest lepsze odprowadzanie ciepła z uzwojeń stojana. Oznacza to równocześnie lepszy stosunek mocy do masy niż dla porównywalnych silników z komutacją mechaniczną. Jednak te zalety są związane z bardziej złożonym sprzętem do sterowania pracą silnika oraz bogatszym układem sensorów. W bezszczotkowym silniku występują także oscylacje momentu, które zostały usunięte dopiero w nowoczesnych rozwiązaniach takich jak np. sinusoidalna komutacja. Dlatego też może być ograniczona równomierność pracy, co szczególnie negatywnie uwidacznia się w przypadku wolnych ruchów obrotowych.

Zaletami silników prądu stałego z komutacją elektroniczną są:

- bardzo dobre własności dynamiczne,
- duża przeciążalność,
- praca bezobsługowa,
- mały moment bezwładności i lepsza wartość stosunku mocy do masy niż w silniku prądu stałego.

Natomiast ich wady to:

- zestaw sensorów i kosztowny układ sterowania,
- często ograniczona równomierność pracy (oscylacje momentu obrotowego),
- wyższe koszty systemu napędowego niż dla konwencjonalnych silników prądu stałego.

Budowa i działanie **silników prądu przemiennego** są oparte na podobnej zasadzie jak silników prądu stałego. Stojan i wirnik składają się z współosiowych cylindrów ferromagnetycznych, w których są umieszczone cewki. Jeżeli obie te cewki są zasilane prądem przemiennym, to jest to podstawowa postać silnika prądu przemiennego. Silniki prądu przemiennego mogą być:

- synchroniczne,

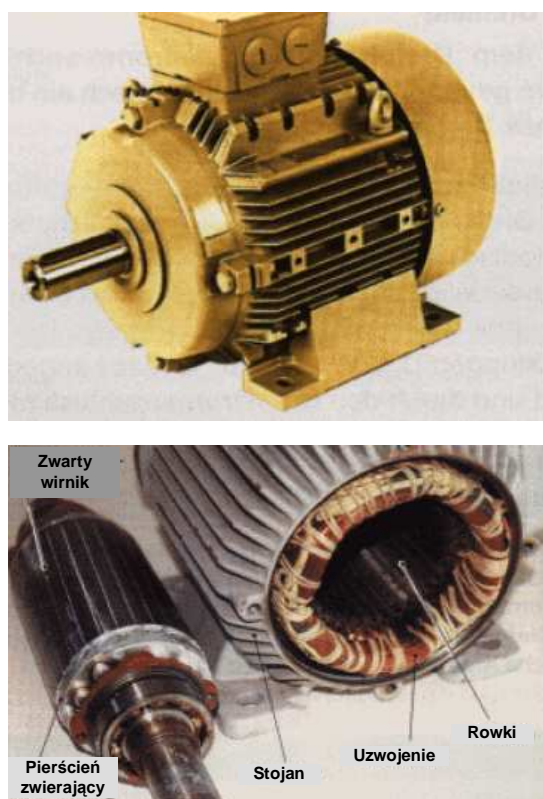
- asynchroniczne,
- silniki elektroniczne (silniki EC).

W stojanie **silnika synchronicznego** występuje wirujące pole elektryczne, a w wirniku pole magnetyczne. Wirowanie pola uzyskuje się przez jedną lub wiele cewek znajdujących się w stojaniu. Silniki synchroniczne podczas wahań obciążenia zachowują stałą prędkość obrotową. Wymagają one jednak wspomagania podczas rozruchu, a przy przeciążeniach zatrzymują się. Jednak przez sterowanie prędkością obrotową można tę wadę wyeliminować. Silniki synchroniczne prądu przemiennego są stosowane np. w napędach posuwu obrabiarek sterowanych numerycznie.

Dla silnika synchronicznego mającego liczbę par biegunów p i włączonego do sieci elektrycznej prądu przemiennego o częstotliwości $f=50$ Hz występuje następująca zależność jego prędkości obrotowej n_s :

$$n_s = 60 f / p \text{ [obr/min]} \quad (4.1)$$

Zatem silnik synchroniczny z jedną parą biegunów ma synchroniczną prędkość obrotową $n_s = 3000$ –obr/min, a dla większej liczby par biegunów wartość tej prędkości jest odpowiednio mniejsza. Dzięki temu na zasadzie przełączania liczby par biegunów można skokowo zmieniać prędkość obrotową silnika.



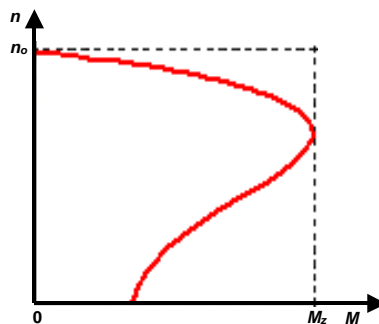
Rys. 4.7 Silnik asynchroniczny

Stojan silnika asynchronicznego jest zbudowany podobnie do silnika synchronicznego. W **wirniku** silnika uzwojenia są zwarte (rys.4.7). Wskutek wirowania pola magnetycznego w stojaniu w uzwojeniach wirnika jest indukowane napięcie i płynie prąd elektryczny, który wytwarza w wirniku pole magnetyczne. To pole magnetyczne wirnika wraz z wirującym polem magnetycznym stojana powoduje

powstanie momentu obrotowego, który wprawia wirnik w ruch obrotowy. Moment obrotowy powstaje tylko wtedy, gdy wirujące pola magnetyczne stojana i wirnika nie wirują jednakowo szybko, a zatem synchronicznie. Ponieważ do wirnika nie musi być doprowadzane zasilanie elektryczne, to ma on prostą budowę i nie jest podatny na zakłócenia w pracy (nie jest potrzebne przekazywanie zasilania przez szczotki i komutator). Wartość indukowanego w wirniku prądu jest tym mniejsza im mniejsza jest różnica pomiędzy prędkością obrotową wirowania pola magnetycznego stojana i prędkością obrotową wirnika. Ta różnica prędkości obrotowych nazywa się **poślizgiem**. Prędkość obrotowa wirnika n silnika asynchronicznego w punkcie pracy nieznacznie odbiega od prędkości obrotowej wirującego pola magnetycznego stojana n_0 . Z wartości obu tych prędkości obrotowych oblicza się poślizg s :

$$s = (n - n_0) / n_0 \quad (4.2)$$

Na rys.4.8 pokazano charakterystykę zewnętrzną silnika asynchronicznego.



Rys. 4.8 Charakterystyka zewnętrzna (moment obrotowy M - prędkość obrotowa n) silnika asynchronicznego, M_z – moment zatrzymania

Zaletami silników asynchronicznych, w porównaniu z silnikami komutatorowymi, są: małe nakłady na pielęgnację, długi okres żywotności, zwarta budowa (jedynie łożyska są zespołami ulegającymi zużyciu), cicha praca i nie występowanie drgań oraz niska cena. Natomiast do **wad** tych silników należą: ograniczona maksymalna prędkość obrotowa, względnie duża masa, względnie niska sprawność, a także złożone sterowanie prędkością obrotową (falowniki).

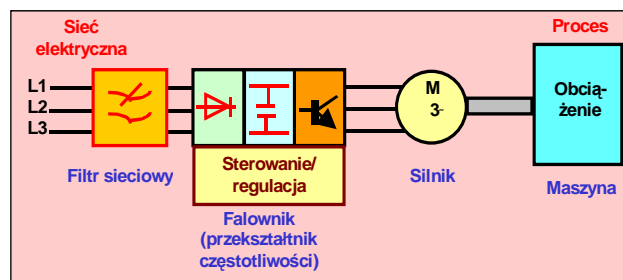
Przykłady zastosowania silników asynchronicznych:

- zwarte napędy: pomp, wentylatorów, obrabiarek,
- cichobieżne napędy: maszyny do pisania, kopiarki,
- napędy z regulowaną prędkością obrotową: maszyny pralnicze, serwonapędy.

Ze względu na prostszą budowę silniki asynchroniczne odgrywają dużą rolę w napędach. I tak w zakresie małych mocy do ok. 1 kW są one powszechnie stosowane w sprzęcie gospodarstwa domowego (np. pralki, lodówki, zamrażarki, pompy i wentylatory). Innym szeroko rozpowszechnionym obszarem zastosowania silników asynchronicznych są obrabiarki i inne maszyny. Natomiast silniki o dużych mocach rzędu 20 MW są stosowane np. w elektrowniach do napędu pomp zasilających kotły.

Rozwój nowych technologii w przemyśle wymusił zupełnie inne niż kiedyś sposoby regulacji prędkości ruchu zespołów różnych maszyn napędzanych silnikami elektrycznymi. Płynna regulacja prędkości obrotowej zespołów roboczych napędzanych silnikami elektrycznymi była dotychczas przeprowadzana za pomocą układu przekładni bezstopniowych i silnika asynchronicznego lub silników prądu

stałego. Dzięki rozwojowi techniki mikroprocesorowej obecnie najtańszym i najprostszym sposobem regulacji jest zastosowanie asynchronicznego silnika klatkowego i przetwornicy częstotliwości. Użycie przetwornicy eliminuje też nieekonomiczne załączanie i wyłączenie silnika powodujące szybkie zużycie samego silnika, a także urządzeń z nim współpracujących. W okresie bardzo dynamicznego rozwoju energoelektroniki opracowano układy regulacyjne współpracujące z silnikami asynchronicznymi prądu przemiennego. Urządzeniem, które umożliwia optymalne wykorzystanie takiego silnika jest **przetwornica częstotliwości** (ang. *static frequency converter*), zwana powszechnie **falownikiem** (rys.4.9). Przetwornice częstotliwości służą do przekształcania energii elektrycznej prądu przemiennego o określonych parametrach (napięcie, częstotliwość) na energię prądu przemiennego o zadanych parametrach zgodnych z wymaganiami użytkownika. Za ich pomocą można płynnie regulować prędkość obrotową klatkowych silników indukcyjnych (asynchronicznych) w pompach (stabilizacja ciśnienia w sieci wodociągowej niezależnie od rozbioru wody), wentylatorach, przenośnikach, taśmociągach, windach, podnośnikach, mieszalnikach, trakach, wyłaczarkach, obrabiarkach, sprężarkach, maszynach włókienniczych, dziewiarskich i pakujących, w przemyśle chemicznym oraz oczyszczalniach ścieków. Mogą one także regulować prędkość obrotową silników synchronicznych mających wirniki z magnesami lub uzwojone. W przeciwieństwie do silników asynchronicznych, silniki te obracają się z prędkością synchroniczną bez względu na obciążenie. Stała wartość strumienia magnetycznego w stojanie silnika jest utrzymywana dzięki stałej wartości stosunku napięcia wyjściowego do częstotliwości (U/f) realizowanej przez przetwornicę. Przetwornica częstotliwości utrzymuje zadaną charakterystykę momentu obciążenia silnika dzięki kontroli stosunku napięcia wyjściowego do częstotliwości prądu wyjściowego oraz prądu obciążenia. Przy stałej wartości U/f strumień magnesujący silnika jest stały (można go przedstawić na wykresie obrazującym wirujące pole magnetyczne silnika), co powoduje utrzymanie stałego momentu obrotowego silnika.



Rys. 4.9 Napędy elektryczne z prędkością obrotową regulowaną przemiennikiem częstotliwości (falownikiem)

W **regulowanych napędach z silnikami asynchronicznymi** uzyskuje się takie zalety jak:

- prostszą, zwartą budowę,
- bezobsługową pracę, mało części ulegających zużyciu,
- mniejsze koszty systemu w porównaniu z silnikami z komutacją elektroniczną.

Natomiast wadami takich napędów są:

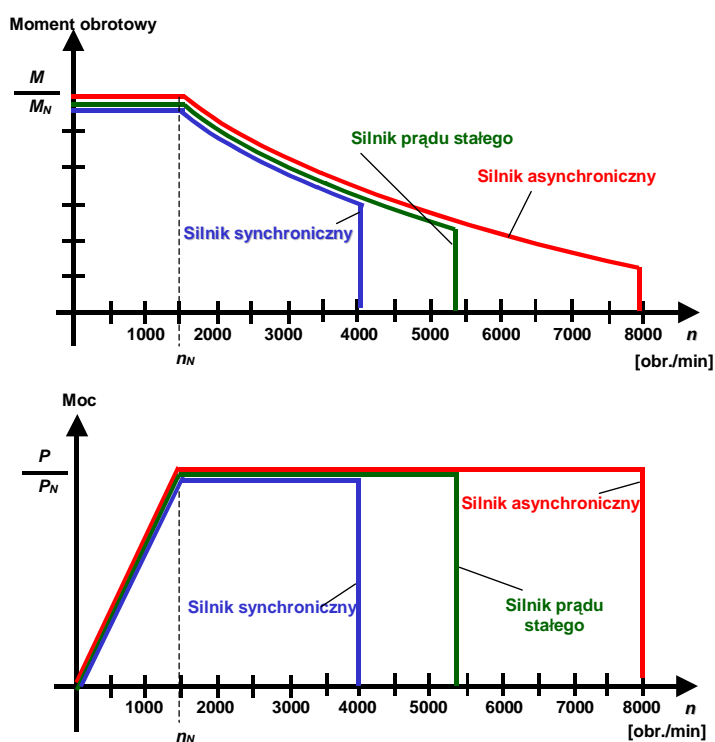
- wysokie nakłady związane ze środkami do zmiany prędkości obrotowej,
- własności serwo tylko w połączeniu ze złożoną elektroniką sterującą,
- większe wartości momentu bezwładności niż w silnikach bezszczotkowych.

Przetwornica częstotliwości składa się z następujących elementów: **prostownika** jedno- lub trójfazowego, który przekształca trójfazowe napięcie przemienne sieci zasilającej na napięcie stałe,

- **stopnia pośredniego**, który przekształca napięcie wyprostowane na napięcie wygładzone o regulowanej lub stałej wartości; wyróżnia się 3 rodzaje stopni pośrednich: stałoprądowy, stałonapięciowy i o regulowanym napięciu, tzw. impulsator (*czoper*). Stopień pośredni jest magazynem energii, który zasila inwerter mocy,
- **inwertera mocy** (falownika) do wytwarzania napięcia trójfazowego o regulowanej wartości i zmiennej częstotliwości. Układ ten jest zbudowany z tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką IGBT (ang. *Insulated Gate Bipolar Transistor*), które mają cechy tranzystorów bipolarnych i polowych typu MOSFET. Dzięki nim można przełączać duże prądy z wielką częstotliwością przy stosunkowo małych stratach energii. Tranzystory można włączać i wyłączać w dowolnej chwili przebiegu napięcia. Dlatego częstotliwość pracy układu tranzystorowego wynosi od 300 Hz do 15 kHz. Do inwertera mocy przyłączany jest silnik,
- **układu sterowania i kontroli**, nazywanego też kartą sterującą, który nadzoruje pracę prostownika, obwodu pośredniego i stopnia mocy. Układ ten analizuje sygnały sterujące oraz umożliwia komunikację z użytkownikiem.

Wszystkie przetwornice częstotliwości mają układ wytwarzający sygnał, który kształtuje przebiegi wyjściowe w trzech fazach. W zależności od zastosowanej metody otrzymywania napięcia wyjściowego przetwornice dzieli się na trzy grupy:

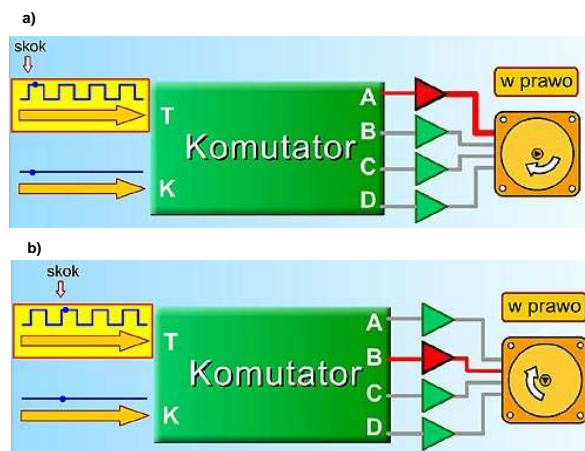
- ze źródłem prądowym CSI (ang. *Current Source Inverter*), z modulacją amplitudy PAM (ang. *Pulse Amplitude Modulation*), z modulacją szerokości impulsów PWM (ang. *Pulse Width Modulation*), w tym przetwornice z kontrolą wektora napięcia VVC (ang. *Voltage Vector Control*).



Rys. 4.10 Charakterystyki napędów elektrycznych

Na rys.4.10 pokazano charakterystyki napędów elektrycznych. Dużą zaletą silników asynchronicznych jest bardzo szeroki zakres prędkości obrotowych w pracy z osłabionym polem. Tryb pracy z osłabionym polem uzyskuje się wówczas, gdy częstotliwość wzbudzenia stojana jest większa niż znamionowa prędkość obrotowa silnika n_N . Oznacza to, że czas który ma uzwojenie (cewka) na wydrukowanie pola magnetycznego w klatce jest za krótki aby wytworzyć wystarczająco silne pole. Dzięki temu prędkość obrotowa n jest nastawiana w bardzo szerokim zakresie przy stałej mocy. Jest to bardzo duża zaleta w porównaniu z silnikami prądu stałego i silnikami synchronicznymi.

Silniki krokowe stanowią korzystną ze względu na koszty alternatywę napędów w zakresie małych mocy (< 500 W). Na rys.4.11 pokazano zasadę działania silnika krokowego. Istnieje wiele typów silników krokowych, które w połączeniu ze zintegrowanymi sterownikami umożliwiają prostą budowę regulowanych zespołów pozycjonowania. Pracujący w sposób sterowany silnik krokowy ma ograniczenia w zakresie swoich zastosowań, ponieważ jego niezawodne działanie wymaga dokładnej znajomości przebiegów obciążenia. Przyjmowanie założenia, że zmiana obciążenia, oddziaływanie sił bezwładności i drgań nie spowodują żadnych błędów skoków jest możliwe tylko do określonej wartości obciążenia. Dlatego też zwykle napęd taki jest przewymiarowany. Jeżeli błędy skoku nie mogą być tolerowane, to napęd musi być realizowany w zamkniętym układzie regulacji. Jednak wówczas znikają istotne korzyści w porównaniu z innymi rodzajami silników elektrycznych. Ponadto silniki skokowe, w porównaniu z innymi silnikami, mają zwykle niższe sprawności i mniejszą przeciążalność.



Rys. 4.11 Zasada działania silnika skokowego: A, B, C, D - kolejne pasma silnika czteropasmowego, T - wejście impulsów taktujących, K - wejście sygnału kierunku: a) wzbudzenie pasma A po pierwszym impulsie taktu na wejściu T, b) wzbudzenie pasma B po drugim impulsie taktu na wejściu T

Zaletami napędów z silnikami krokowymi są:

- bezpośrednie cyfrowe sterowanie za pomocą zintegrowanych układów,
- niezawodność, bezobsługowość,
- tanie rozwiązanie napędu,
- możliwe sterowanie pracą bez czujnika położenia.

Natomiast ich **wady** to:

- muszą być znane charakterystyki obciążenia \Rightarrow konieczne przewymiarowanie,
- względnie małe gęstości mocy,

- w sterowanym trybie pracy niebezpieczeństwo wystąpienia błędów skoku,
- stosunkowo mała dynamika działania napędu.

Ze względu na własności, którymi odznaczają się silniki skokowe, znalazły one bardzo wiele różnorodnych zastosowań. Ich udział ilościowy w całej grupie małych maszyn elektrycznych przekracza 15% i stale rośnie. Znaleźć je można wszędzie tam, gdzie wymagane jest precyzyjne pozycjonowanie kątowe lub liniowe (rys.4.12).

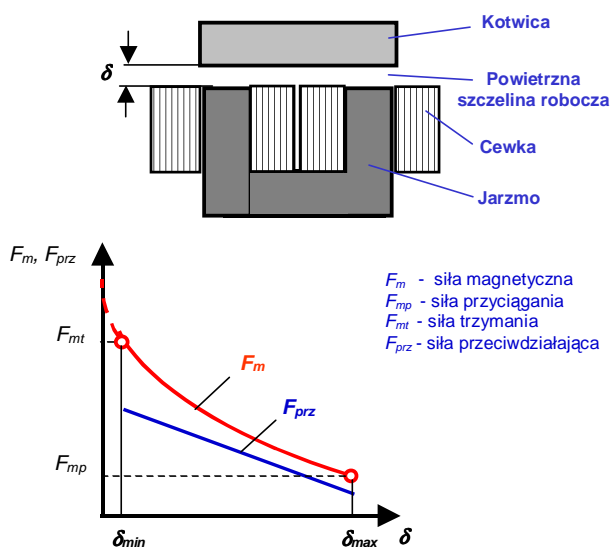


Rys. 4.12 Zastosowanie silników krokowych

Najwięcej silników skokowych znajduje się w komputerach i ich urządzeniach peryferyjnych (stacjach dyskietek, dyskach twardych, czytnikach i nagrywarkach płyt CD i DVD, drukarkach, skanerach). W każdym komputerze PC jest kilka takich silników. Drugą grupą urządzeń powszechnego użytku, w których znaleźć można wiele różnorodnych silników skokowych, są wyroby mechanizujące prace biurowe, zapisujące i odczytujące informacje dźwiękowe oraz obrazowe, a także zegary i zegarki z regulatorem kwarcowym. Nowoczesne aparaty fotograficzne, kamery wideo, rzutniki obrazów i projektory, czy pozycjonery anten satelitarnych, telefaksy mają w swej budowie silniki skokowe. Setki milionów silników skokowych pracuje na całym świecie w urządzeniach technologicznych, a wśród nich w robotach, manipulatorach, pozycjonerach, drukarkach kodów, układach selekcji, w maszynach sprzedających, pakujących i wielu, wielu innych. Silniki do zastosowań technologicznych, a szerzej profesjonalnych, często nazywa się elektromaszynowymi elementami automatyki, wyróżniając tą nazwą maszyny o szczególnie wysokiej jakości wykonania i stabilności parametrów. Podobnie wysokie wymagania odnośnie jakości wykonania i dokładności ruchu stawiane są silnikom stosowanym do budowy aparatury medycznej, jeszcze wyższe do urządzeń militarnych i lotnictwa, a najwyższe do sprzętu kosmicznego. Do elektrycznych aktuatorów reluktancyjnych **należą elektromagnesy**. Są one zespołami napędowymi o prostej i zwartej budowie, które w coraz większym zakresie i większych ilościach są stosowane w budowie maszyn, pojazdach i automatyzacji. Służą one w szczególności do uzyskiwania ograniczonych przemieszczeń liniowych (0,1–100 mm) lub kątowych (0,1–90°). Często są one wykonane nie jako pojedynczy element, ale integralna część złożonych składników funkcyjnych (np. zaworów magnetycznych, sprzęgieł magnetycznych, przekaźników, styczników).

Główną częścią składową elektromagnesu jest **kotwica** jako organ ruchomy, **jarzmo**, które służy jako żelazna zwora oraz **cewka** (rys. 4.13). Działanie elektromagnesów polega na tym, że po włączeniu cewki do prądu powstaje pole magnetyczne, które powoduje przyciągnięcie kotwicy do jarzma. Elektromagnesy są elektromagnetycznymi przetwornikami energii. Zamieniają one doprowadzoną

energię elektryczną, poprzez pośrednią postać energii magnetycznej, na energię mechaniczną, która służy do uzyskania ruchu.

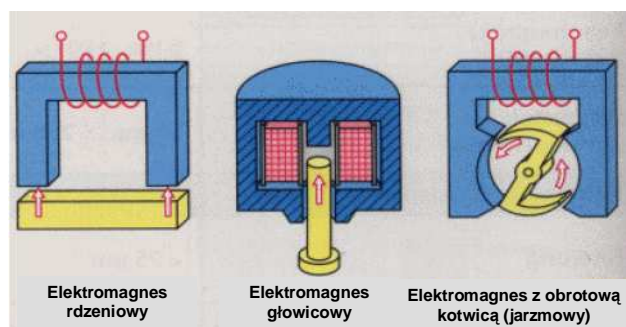


Rys. 4.13 Elektromagnes

Rozróżnia się:

- elektromagnesy prądu stałego,
- elektromagnesy prądu przemiennego,
- elektromagnesy spolaryzowane.

Elektromagnesy (rys. 4.14) w realizacji zadań pozycjonowania o dużych wymaganiach dynamicznych i małych wartościach sił są obecnie najkorzystniejszymi ze względu na koszty rozwiązaniami napędu („element o małym skoku”). Prosta budowa w połączeniu z elektryczną energią pomocniczą umożliwia realizację szybkich obwodów sterowniczych (np. układy wtrysku paliwa). Dla małych wartości przemieszczeń za pomocą tzw. elektromagnesów uruchamiających uzyskuje się duże siły przyciągania przy zwartej budowie. Te własności są szczególnie niezbędne podczas nastawiania hydraulicznych i pneumatycznych strumieni płynów, gdzie elektromagnes powinien realizować ciągłe ruchy wykonawcze. W tym celu musi być linearyzowana nieliniowa charakterystyka siły magnetycznej wynikająca z zasady działania, co zwykle uzyskuje się przez odpowiednie ukształtowanie geometryczne obwodu magnetycznego. Zjawiska nasycenia materiałów magnetycznych ograniczają przy tym działanie siły elektromagnetycznej i tym samym zakres nastawiania takiego aktuatora do wartości 10–25 mm.



Rys. 4.14 Rodzaje elektromagnesów

Zaletami elektromagnesów są:

- prosta, zwarta i tania budowa,
- bezpośrednie uzyskiwanie ruchów liniowych,
- bardzo wysoka dynamika działania.

Natomiast ich wady to:

- nieliniowe przebiegi,
- mała gęstość mocy,
- tarcie i histereza magnetyczna,
- duża wartość prądu spoczynkowego,

Elektromechaniczne urządzenia nastawiające są bardzo rozpowszechnione. Duża ilość typów, szczególnie silników, umożliwia elastyczne dopasowanie do realizacji różnorodnych zadań. Napędy elektryczne w obszarze małych i średnich mocy nastawiania mają dominującą pozycję, która wynika m.in. z dużej dostępności i możliwości przekształcania energii elektrycznej. Ponadto zapewniają one wysokie dokładności pozycjonowania przy dobrych własnościach dynamicznych. Wysoka sprawność całego układu jest wyższa niż dla porównywalnych składników pneumatycznych i hydraulicznych.

Do zalet napędów elektromechanicznych należą:

- dobre własności regulacyjne,
- duża dynamika,
- elastyczne rozwiązania napędów,
- duża sprawność,
- dobre możliwości diagnostyczne.

Natomiast ich wadami są:

- ograniczona gęstość mocy,
- zużycie energii w pracy statycznej,
- ograniczony termicznie zakres pracy,
- duży udział „ruchomych części mechanicznych”.

4.2.2 Aktuatory hydrauliczne i pneumatyczne

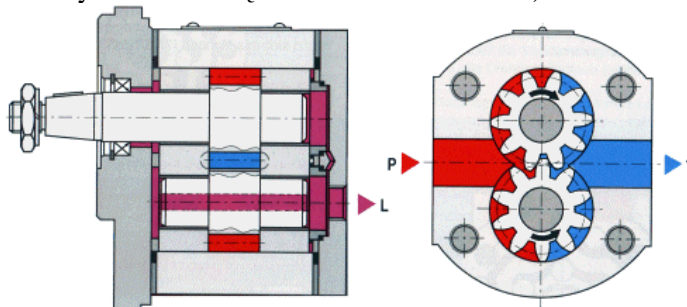
Hydrauliczne aktuatory zamieniają energię hydrauliczną (energię strumienia i energię ciśnienia) cieczy w energię mechaniczną.

Rozróżnia się dwa rodzaje takich aktuatorów:

- silniki hydrauliczne,
- siłowniki hydrauliczne.

Napędy hydrauliczne pozwalają na uzyskiwanie z małej przestrzeni bardzo dużych sił. Silniki hydrauliczne przetwarzają uzyskaną przez pompy energię hydrauliczną ponownie na energię mechaniczną. Ciecz pod ciśnieniem napędza elementy wyporowe takie jak: koła zębate, łopatki lub tłoki. Silniki hydrauliczne są budowane dla jednego lub dwóch kierunków strumienia, a także jako silniki o stałej i zmiennej prędkości obrotowej. Budowa silników zębatych (rys. 4.15) pod względem konstrukcyjnym jest podobna do hydraulicznych pomp zębatych. Wskutek dostarczanej pod ciśnieniem cieczy hydraulicznej (oleju) na koła zębate silnika działa moment obrotowy, który jest wyprowadzany na wałek silnika. Silniki zębate są zaliczane do silników szybkoobrotowych. Są one stosowane dla prędkości obrotowych powyżej 500 obr/min. W przeciwieństwie do układów pneumatycznych, tutaj silnik rotacyjny ma istotne znaczenie, ponieważ zapewnia duże wartości

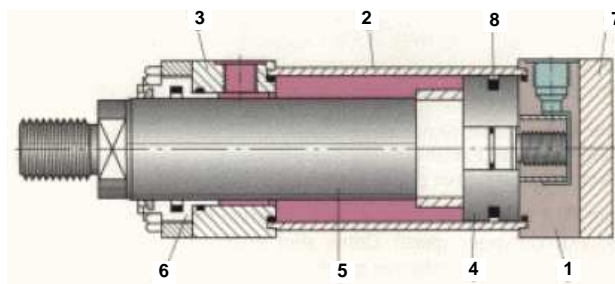
momentu obrotowego przy małych momentach bezwładności (stosunek gęstości mocy hydrauliki/ pneumatyki zawiera się w zakresie od 10 do 25).



Rys. 4.15 Hydrauliczny silnik zębaty

Hydrauliczne urządzenia wykonawcze są przeważnie stosowane tam, gdzie wymagane są duże siły wzgl. przyspieszenia, przy równoczesnej małej przestrzeni zabudowy. Ponieważ pomimo uzyskiwania dużych wartości sił poruszane są małe masy, to możliwe jest szybkie i dynamiczne pozycjonowanie. Dalszymi ich zaletami, w porównaniu z układami pneumatycznymi, są wysoka sztywność i odporność na uderzenia. Dzięki temu uzyskuje się bardzo małe stałe czasowe i tym samym możliwość bardzo dynamicznej realizacji ruchu obrotowego. Małe wartości prędkości obrotowych dają się jednak realizować tylko z względnie nierównomiernym ruchem obrotowym.

Ruchy translacyjne są uzyskiwane za pomocą siłowników hydraulicznych (rys.4.16). W aplikacjach o wysokich wymaganiach stosowane są serwo-siłowniki ze specjalnymi uszczelkami i bardzo wysoką jakością współpracujących ze sobą powierzchni cylindra i tłoka oraz tłoczyska siłownika.



Rys. 4.16 Siłownik hydrauliczny: 1 - podstawa siłownika, 2 - cylinder, 3 - głowica siłownika, 4 - tłok, 5 - tłoczysko, 6 - tuleja prowadząca, 7 - tarcza do mocowania, 8 – uszczelnienie

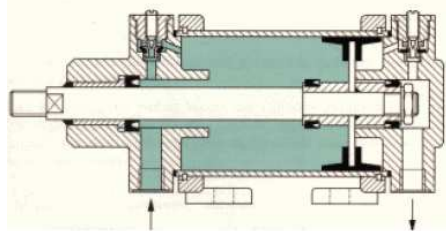
Zalety napędów hydraulicznych to:

- małe gabaryty,
- wysoka dynamika i gęstość mocy,
- duża sztywność,
- duże możliwości pracy.

Natomiast ich wadami są:

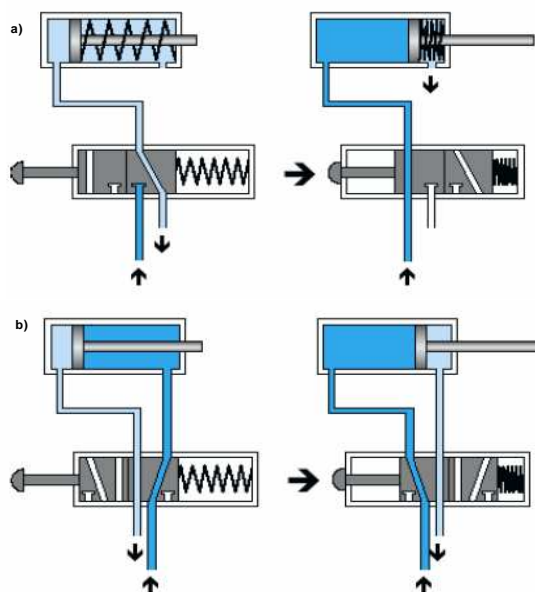
- wysokie koszty całego systemu,
- układ składający się z dwóch części,
- niezbędne zasilanie sprężonym olejem,
- tarcie i złożona dynamika utrudniają regulację.

Pneumatyczne urządzenia nastawiające wykorzystują fizyczne własności sprężonego powietrza. Wysoka stabilność kompresji i zdolność magazynowania energii, a także mała lepkość tego medium transmisyjnego umożliwiają budowę efektywnych i dynamicznie działających układów napędowych. Przy prostej i zwartej budowie (jedno przyłącze) napędy pneumatyczne są odpowiednie do tego, aby realizować średnie wartości siły nastawiania (rzędu kilku kN), przy czym można równocześnie uzyskiwać duże prędkości ruchów roboczych i duże całkowite przemieszczenia. Oprócz tych własności odznaczają się one także wysoką niezawodnością pracy w ekstremalnych warunkach otoczenia (odporność na temperaturę, zabrudzenia, przeciążenia i eksplozję). Ponadto zapewniona jest odporność na pola elektromagnetyczne oraz promieniowanie świetlne. Przetwarzanie energii pneumatycznej w mechaniczną jest realizowane w siłownikach pneumatycznych (rys. 4.17) lub membranowych do uzyskiwania ruchów translacyjnych oraz w silnikach pneumatycznych do uzyskiwania ruchów rotacyjnych.



Rys. 4.17 Siłownik pneumatyczny

Wynikające z zasady działania aktuatorów pneumatycznych takie cechy jak mała i zależna od pozycji sztywność, względnie duże tarcie tłoka w cylindrze oraz nieliniowe własności serwozaworów wymagają znacznych nakładów związanych z regulacją. Jednak wraz z trendem do miniaturyzacji składników pneumatycznych i wzrostem możliwości sterowania oczekuje się większego zastosowania tego rodzaju aktuatorów. Na rys. 4.18 pokazano dwa rodzaje siłowników pneumatycznych.



Rys. 4.18 Rodzaje siłowników pneumatycznych: a- siłownik jednostronnego działania, b - siłownik dwustronnego działania

Do zalet napędów pneumatycznych należą:

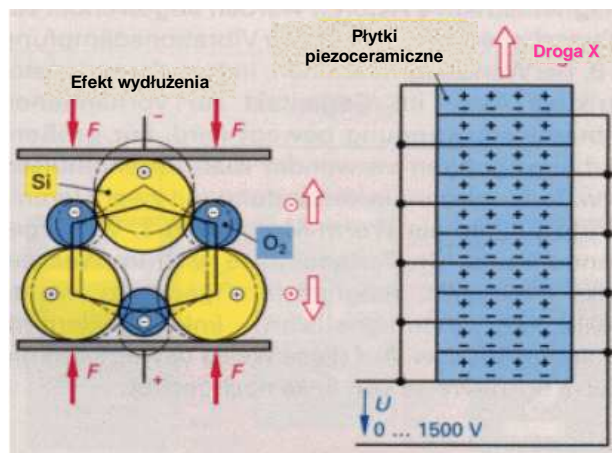
- duże możliwości robocze,
- szeroki zakres temperatur pracy,
- korzystny stosunek mocy do masy,
- wysoka niezawodność i pewność pracy,
- dobry stosunek możliwości / cena.

Natomiast ich wady to:

- znaczne nakłady związane z przygotowaniem sprężonego powietrza,
- duże wymiary (gabaryty),
- tarcie i ściśliwość powietrza utrudniają regulację,
- ograniczona dokładność pozycjonowania.

4. 2. 3 Aktuatory niekonwencjonalne

Dzięki badaniom nad materiałami i zastosowaniem nowoczesnych technologii wytwarzania w ostatnim czasie zostały ulepszone liczne „niekonwencjonalne” wzgl. opracowane nowe rozwiązania aktuatorów. Wspólną cechą w takich członach wykonawczych jest wykorzystanie szczególnych zjawisk (efektów) fizycznych, jakie występują w połączeniu z nowymi materiałami bazowymi. Techniczne wykonania takich aktuatorów mają wysoki stopień specjalizacji, z czym związane jest ograniczenie obszarów zastosowań. Ponadto bardzo duże koszty materiałów hamują ich szersze rozpowszechnienie.



Rys. 4.19 Aktuator piezoelektryczny

Jednak rozwój np. aktuatorów piezoelektrycznych (rys. 4.19) wskazuje na duże perspektywy zastosowań. I tak np. **piezoelektryczne człony wykonawcze** mają zdolność przetwarzania zarówno wielkości mechanicznych w elektryczne jak i elektrycznych w mechaniczne. To dwukierunkowe przetwarzanie daje się wykorzystać m.in. do zadań przemieszczania. Techniczne wykorzystanie efektu piezoelektrycznego jest jednak możliwe tylko przez zastosowanie odpowiedniej piezoceramiki. W połączeniu z polami elektrycznymi w zakresie [kV/m] dają się uzyskać zmiany długości w zakresie μm . Ruch roboczy jest sterowany przez podawanie napięcia. Jego realizacja odbywa się w czasie kilku μs z możliwością pokonywania dużych sił oporu. Zastosowanie aktuatorów piezoelektrycznych powinno się odbywać przy uwzględnieniu termicznych i mechanicznych warunków

pracy. Elementy piezoceramiczne są bardzo cienkimi, kruchymi materiałami, które mają własności zależne od temperatury i procesów starzenia. Dlatego też ekstremalne obciążenia łatwo prowadzą do powstania zjawiska depolaryzacji materiału i tym samym osłabienia efektu piezoelektrycznego. Ponadto należy zwracać uwagę na to, że spowodowane działaniem ciepła (temperatury) wartości zmiany długości mogą być rzędu zakresu pracy aktuatora.

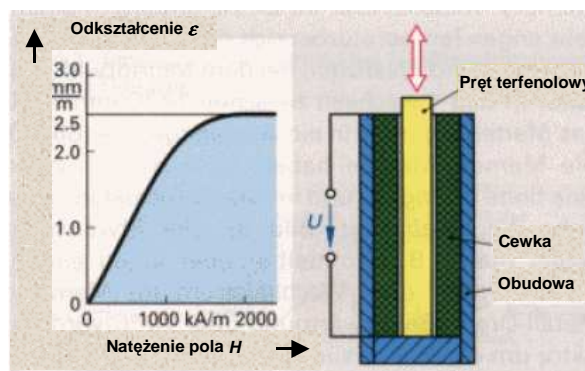
Zaletami aktuatorów piezoelektrycznych są:

- duże siły działania przy bardzo wysokiej dynamice,
- w pracy statycznej jest mały pobór mocy,
- duża dostępność materiałów ceramicznych,
- wysoka gęstość mocy,
- praktycznie nie ulegają zużyciu.

Natomiast ich wady to:

- tylko bardzo małe zakresy realizacji przemieszczeń,
- silne nagrzewanie przy dużych częstotliwościach pracy,
- zależne od temperatury i starzenia własności materiałów,
- konieczny zasilacz wysokiego napięcia do sterowania,
- luzy i histereza.

W różnych materiałach ferromagnetycznych wskutek działania zewnętrznego pola magnetycznego zmieniają się odległości między atomami. Dzięki temu za pomocą sterowanego natężenia pola magnetycznego H wskutek **zjawiska magnetostrykcji** daje się uzyskiwać względne zmiany długości ϵ , których wartości dla materiałów o dużej magnetostrykcyjności wynoszą 1–2 mm/m (rys.4.20). Uzyskiwane siły są większe niż dla porównywalnych piezoaktuatorów i są rzędu 500 N/mm. Magnetostrykcyjne aktulatory są jeszcze obecnie ciągle w stadium rozwoju. Dostępność stopów metali z własnościami magnetostrykcyjnymi jest silnie ograniczona, a ich ceny są odpowiednio wysokie. Najważniejszymi technicznymi rozwiązaniami są magnetostrykcyjne aktulatory liniowe, które pozwalają na uzyskiwanie bardzo dokładnych ruchów w maksymalnych zakresach 50–200 μm i wartościach sił do 20 kN. Tworzenie pola magnetycznego można efektywnie uzyskiwać np. przez sterowanie wartością prądu.



Rys. 4.20 Charakterystyka i budowa aktuatora magnetostrykcyjnego

Do zalet aktuatorów magnetostrykcyjnych należą:

- duże wartości siły działania,
- bardzo wysoka dynamika wzgl. częstotliwość pracy,
- duży zakres temperatur pracy,
- zwarta budowa,

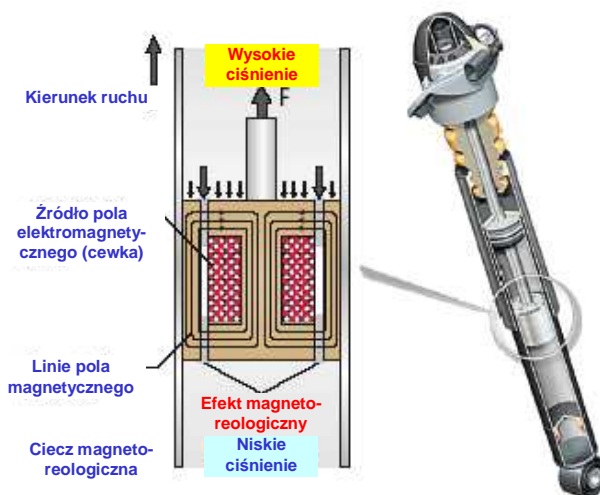
- praktycznie nie ulegają zużyciu.

Natomiast ich wady to:

- są drogie i wymagają trudno dostępnych materiałów,
- mają histerezę,
- wymagają poboru prądu podczas pracy statycznej,
- pierścieniowa budowa,
- występuje silne nagrzewanie przy wysokich częstotliwościach.

Ciecze magnetoreologiczne są jednorodnymi mieszaninami składającymi się z cieczy z zawartymi w niej drobnymi cząstkami stałymi (ang. *Suspension*). Stałe cząstki z materiału ferromagnetycznego mają wielkość 0,1 do 10 μm . Są one umieszczone w cieczy na bazie oleju silikonowego lub mineralnego albo też wody. Pod wpływem pola magnetycznego następuje wiązanie się ze sobą cząstek ferromagnetycznych. Uzyskuje się silnie anizotropowe przebiegi ze zmieniającą się lepkością aż do stanu ciała stałego. Bez oddziaływania pola magnetycznego ciecz magnetoreologiczna zachowuje się jak ciecz Newtonowska.

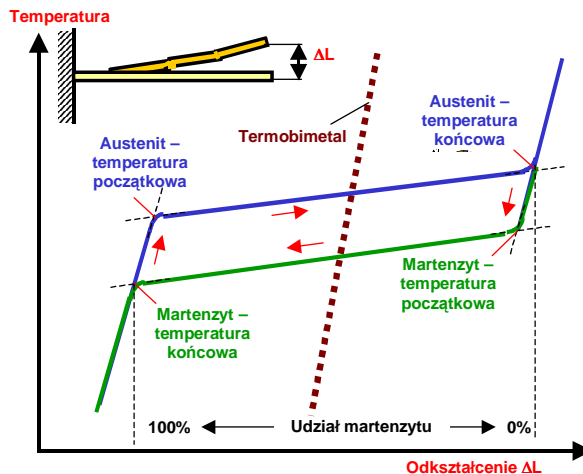
Zastosowanie cieczy magnetoreologicznej do regulowanego tłumienia drgań jest od pewnego czasu przedmiotem intensywnych prac badawczych (rys. 4.21). Są już także pierwsze aplikacje w samochodach. I tak np. układy tłumienia drgań o nazwie „*Magneride*” firmy Delphi są stosowane w samochodach Audi model TT oraz w Corvette i Ferrari. Zastosowania układów tłumienia drgań z zastosowaniem cieczy magnetoreologicznej są możliwe w różnych obszarach. Przykładem tego jest tłumienie drgań w mostach. Innymi możliwymi zastosowaniami jest tłumienie ruchów i drgań w obrabiarkach, robotach i maszynach manipulacyjnych. We wszystkich tych potencjalnych przypadkach zastosowań zalety tłumienia drgań za pomocą cieczy magnetoreologicznej można wykorzystać tylko wtedy, gdy tłumiony układ (obiekt regulacji) będzie można wystarczająco dokładnie odwzorować za pomocą modelu i przeprowadzić symulację, aby móc w sposób niezawodny regulować tłumienie.



Rys. 4.21 Zastosowanie cieczy magnetoreologicznej w tłumieniu drgań

Zjawisko „pamiętania kształtu” przez metale zostało odkryte przypadkowo przed ok. 40-łaty w stopach miedzi. Później efekt ten stwierdzono także w stopach tytanu i niklu, które obecnie okazały się najbardziej efektywne w zastosowaniach praktycznych. Opracowane zostały nowe rodzaje aktuatorów, które są wykonane ze **stopów z pamięcią kształtu** (ang. *Memory-Metalle*), zaliczanych do materiałów

zaawansowanych (ang. *Intelligent Materiale*). Stopy z pamięcią kształtu przy osiągnięciu określonej temperatury zmieniają skokowo swój stan (rys. 4.22), czyli kurczą się, rozciągają się, lub też stają się super-elastyczne. Własności te można porównać ze znanymi powszechnie elementami nastawiającymi z bimetalami.



Rys. 4.22 Zasada działania aktuatora z pamięcią kształtu

Również w bimetalach występuje podwójna funkcja, a mianowicie taki element może być równocześnie sensorem i aktuatorem (np. włącznik termiczny - termostat). Jednak inaczej niż w bimetalach, które przy ogrzewaniu odkształcają się w sposób ciągły, w przypadku stopów z pamięcią kształtu przy określonej temperaturze następuje spontaniczna reakcja w postaci nagłej zmiany kształtu. Fizycznym wyjaśnieniem zjawiska pamięci kształtu jest występowanie dwóch rodzajów sieci krystalicznych, pomiędzy którymi takie stopy zmieniają swoją strukturę. Te struktury sieci krystalicznych są określane jako austenit i martenzyt. Podczas nagrzewania i chłodzenia struktura sieci krystalicznej stopu przechodzi z fazy niskiej temperatury tzn. martenzytu w fazę wysokiej temperatury czyli austenitu.

4. 3 Dobór napędów i własności aktuatorów

Ponieważ w hydraulicznych i pneumatycznych układach napędowych stosowane są siłowniki, to takie rozwiązania mogą być szczególnie korzystne w realizacji przemieszczeń liniowych zespołów roboczych maszyn. Natomiast układy elektryczne, oparte na obracających się silnikach, wymagają stosowania specjalnych zespołów mechanicznych (przekładni, np. śruby pociągowej) do uzyskiwania ruchu posuwistego (liniowego).

Przy doborze zespołów realizujących ruch należy brać pod uwagę m.in. następujące czynniki:

- **Dokładność i powtarzalność ruchu** – sterowane elektronicznie serwomechanizmy zapewniają najwyższy poziom dokładności i powtarzalności. W aplikacjach wymagających utrzymywania stałego ciśnienia (siły) w nieruchomym zespole korzystne jest zastosowanie układów hydraulicznych.
- **Złożoność** – w aplikacjach wieloosiowych (kilka ruchomych zespołów roboczych, np. w obrabiarce czy robocie) najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie układów serwomechanizmowych sterowanych cyfrowo ze względu na możliwość dokładnej ich synchronizacji.

- **Wydajność** – zwiększenie wydajności maszyny technologicznej czy linii produkcyjnej można uzyskać dzięki zastosowaniu zespołów napędzanych elektrycznie (osiągane prędkości ruchu są rzędu 10 m/s, a zatem dwukrotnie większe niż z napędami pneumatycznymi i hydraulicznymi).
- **Koszty inwestycyjne, eksploatacyjne i utrzymania ruchu** – to kryterium nie powinno decydować o wyborze rodzaju napędu, gdyż konieczne jest ich oszacowanie dla konkretnych przypadków zastosowań.

Od producentów (dostawców) zespołów napędowych i urządzeń automatyki wymaga się takich wyrobów i systemów, za pomocą których można zwiększyć wydajność, niezawodność i dokładność pracy maszyn. Szczególnym wymaganiem jest także to, aby wyroby te były tanie i zapewniały szeroki obszar zastosowań w różnych dziedzinach, regionach i aplikacjach. Chodzi zatem o tak elastycznie rozwiązany wyrób, który może być łatwo dostosowany do okoliczności.

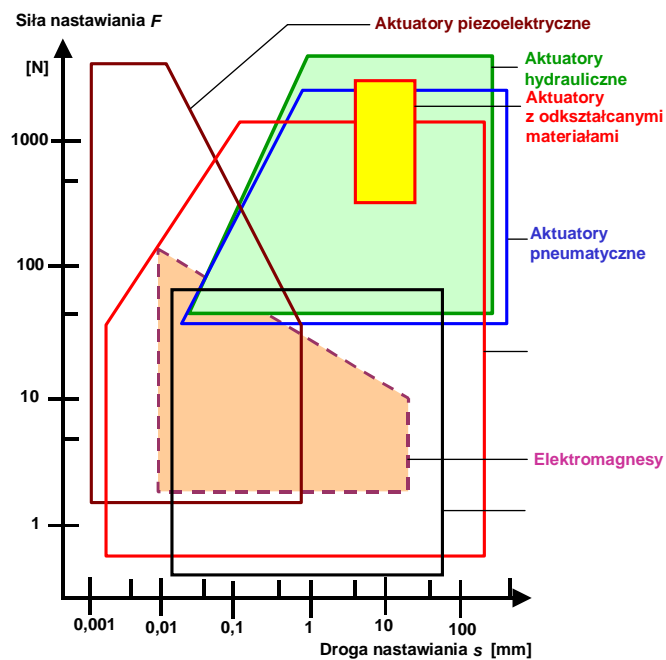
Napęd działa zwykle za pośrednictwem elektromechanicznego przetwornika energii – silnika – często przy pomocy elementów (zespołów) mechanicznych takich jak przekładnie, na przebieg procesu obróbki (obrabiarki), transportu (przenośnik) lub produkcji. Matematyczny opis procesu jak również zastosowanie odpowiednich sensorów i metod regulacji są podstawą budowy odpowiedniego układu napędowego. Dlatego też z analizy procesu wynikają wymagania dotyczące napędów:

- dobór odpowiednich silników i zespołów przeniesienia napędu (np. przekładnia, śruba pociągowa),
- możliwość zastosowania różnych układów pomiarowych do uzyskiwania wymaganych wielkości stanu takich jak położenie, prędkość obrotowa czy przyspieszenie,
- nowoczesne (zaawansowane) metody regulacji, aby uzyskać wymagane dokładności wielkości związanych z procesem,
- zapewnienie odpowiednio dużej liczby funkcji technologicznych, np. sterowanie ruchem MC (ang. *Motion Control*).

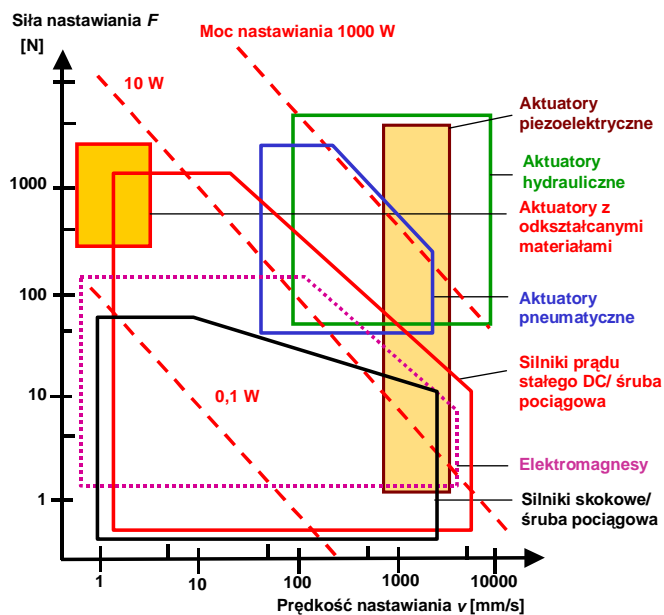
W tab. 4.1 zamieszczono zestawienie właściwości poszczególnych rodzajów napędów.

Tab. 4.1 Właściwości różnych napędów

Typ napędu	Elektryczny	Hydrauliczny	Pneumatyczny
Porównywana właściwość			
Sprawność [%]	50–55	30–25	15–25
Moc z jednostki [W/kg]	25–150	650	300
Wytrzymałość [cykli]	5–9 10 ⁶	6 10 ⁶	>10 ⁷
Sztywność [kN/mm]	10–120	30	1
Przeciążalność [%]	25	50	50–150
Zakres ruchu liniowego [m]	0,3–5	0,02–2	0,05–3
Prędkość liniowa [m/s]	0,001–5	0,002–2	0,05–30
Dokładność pozycjonowania [mm]	0,005	0,1–0,05	0,1
Trwałość (względna)	Normalna	Gorsza	Lepsza
Serwis (względnie)	Normalny	Wyższy	Niższy
Wady	Zakłócenia elektryczne i magnetyczne, nagrzewanie	Wycieki, kłopotliwe dostarczanie energii	Hałaśliwy
Zalety	Łatwość przesyłu i magazynowania energii	Duże moce z małej objętości	Bezpieczny



Rys. 4.23 Charakterystyki różnego rodzajów aktuatorów - zależność siły F od drogi nastawiania s



Rys. 4.24 Charakterystyki różnego rodzajów aktuatorów - zależność siły F od prędkości nastawiania v

Na rys. 4.23 i 4. 24 zamieszczono charakterystyki różnego rodzaju aktuatorów. Zawierają one zależności siły nastawiania F od drogi s oraz zależności siły nastawiania F od prędkości ruchu v .

5. Sterowniki i systemy wbudowane

5.1 Sterowniki przemysłowe PLC, CNC i RC

W przeszłości do realizacji zadań sterowania były wykorzystywane sztywne układy sprzętowe (np. przekaźnikowo-stycznikowe). Natomiast od ok. 35 lat są one wypierane przez elastyczne w zastosowaniach i o dużej funkcjonalności sterowniki komputerowe.

Sterowniki komputerowe w systemach mechatronicznych służą do przetwarzania danych (sygnałów) pochodzących z sensorów i realizacji funkcji systemu. Sterowniki te wraz z ich oprogramowaniem są odpowiednikami mózgu. Sygnały wyjściowe ze sterowników służą do wysterowywania aktuatorów. Rozwój sterowników przemysłowych jest ściśle związany z postępami w technikach komputerowych.

Wymagania komputerowych sterowników przemysłowych stosowanych w systemach mechatronicznych obejmują:

- **zdolność do pracy w czasie rzeczywistym** (systemy operacyjne, architektura pamięci),
- **wprowadzanie i wyprowadzenie sygnałów procesu** (przyłączenie sensorów i elementów wykonawczych, systemy komunikacyjne),
- **pewność i niezawodność działania** (wysokiej jakości składniki, staranny montaż, układy redundantne),
- **odporność na działanie warunków otoczenia** (specjalne obudowy, odpowiedni montaż przewodów łączących). Istnieją dwa zasadnicze rodzaje zadań realizowanych przez sterowniki (komputery) przemysłowe w systemach automatyzacji, a mianowicie takie, które są związane z: **wymaganiami czasu rzeczywistego**:
 - sterowanie przebiegiem procesów,
 - zadania regulacji, **bez wymagań czasu rzeczywistego**:
 - kierowanie procesami, zarządzanie recepturami,
 - interfejs człowiek-maszyna HMI (ang. *Human-Machine Interface*),
 - planowanie i sterowanie produkcją,
 - archiwizacja i oddziaływanie na wsad (wytop) procesu.

Obecne stosowane sterowniki i komputery przemysłowe składają się z architektur mikroprocesorowych. Zależnie od budowy można wyróżnić następujące podstawowe typy sterowników (komputerów):

1. **Systemy jednopłytkowe ES** (ang. *Embedded Systems*), tzn. systemy okrojone do realizacji jednego zadania, najczęściej z mikrokontrolerem jako jednostką centralną.
2. **Systemy PC** (ang. *Personal Computer*).
3. **Modułowe systemy mikrokomputerowe**, skalowalne systemy mikrokomputerowe dla różnych zadań automatyzacji.
4. **Komputerowe sterowniki przemysłowe, np. sterowniki swobodnie programowalne PLC** (ang. *Programmable Logical Controller*), **układy sterowania numerycznego CNC** (ang. *Computerized Numerical Controller*) i **sterowniki robotów RC** (ang. *Robot Control*), tzn. systemy komputerowe przeznaczone do realizacji zadań sterowania i regulacji w różnego rodzaju maszynach (np. obrabiarkach sterowanych numerycznie, robotach przemysłowych), urządzeniach i instalacjach.

We wszystkich przypadkach zawierają one:

- jądro mikroprocesorowe, procesory sygnałowe lub mikrokontrolery,
- pamięć,
- interfejsy do urządzeń peryferyjnych,
- magistralę systemową.

Sterowniki przemysłowe mogą być klasyfikowane ze względu na swoją budowę oraz realizowane przez nie funkcje.

I tak jeżeli chodzi o budowę to są to:

- systemy kompaktowe,
- systemy modułowy,
- systemy specjalne.

Przy doborze sterowników do określonych obiektów uwzględnia się:

- liczba sygnałów wejściowych i wyjściowych I/O (ang. *Input/Output*) wprowadzanych i wyprowadzanych do sterownika,
- istniejącą przestrzeń do zabudowy,
- możliwość rozbudowy,
- wymaganą moc obliczeniową.

Jeżeli chodzi natomiast o funkcje realizowane przez sterowniki przemysłowe to może to być:

- sterowanie procesem w oparciu o sygnały cyfrowe lub analogowe w logicznych lub sekwencyjnych układach sterowania, lub też regulacja,
- sterowanie torem ruchu, które jest charakterystyczne dla takich obiektów jak roboty przemysłowe i obrabiarki sterowane numerycznie,
- interfejs użytkownika HMI.

Podczas doboru rodzaju sterownika komputerowego bierze się głównie pod uwagę to, czy będą realizowane:

- określone zadanie automatyzacji, wtedy stosowane są np. sterowniki CNC czy RC,
- spektrum zadań, wówczas należy rozpatrzyć zastosowanie przemysłowego komputera PC (IPC – ang. *Industrial Personal Computer*).

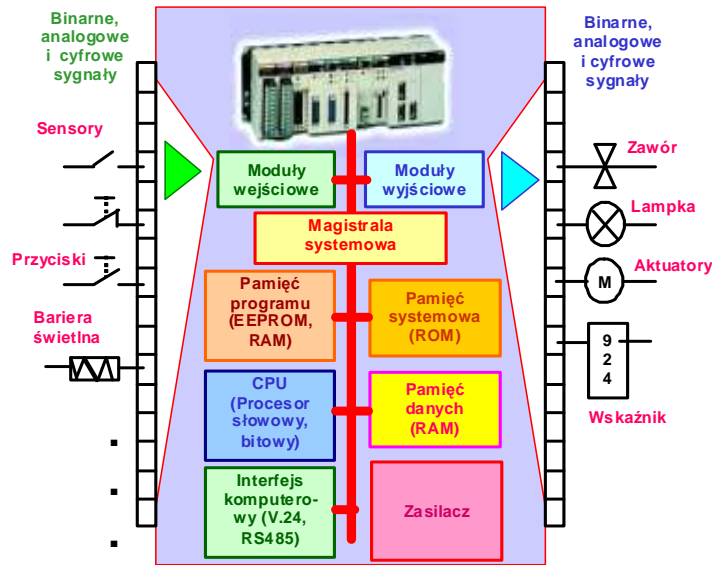
I tak w przypadku sterowania przebiegiem procesów sterownik realizuje przetwarzanie sygnałów procesu (z sensorów), jest jeden program aplikacyjny opracowany przez producenta obiektu, a najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie sterownika swobodnie programowalnego.

Natomiast w przypadku kształtowego sterowania ruchem (obrabiarki, roboty) występuje także przetwarzanie danych geometrycznych i konieczne są różne pogromy technologiczne dla każdego procesu (wymagana jest możliwość programowania). Wówczas stosowane są układy sterowania numerycznego CNC (obrabiarki), lub sterowniki robotów RC .

Jeżeli są realizowane zadania ogólne (włącznie z wyżej wymienionymi), konieczna jest obsługa i obserwacja, kierowanie przebiegiem procesów i jest duża różnorodność aplikacyjna, to wówczas odpowiednim rozwiązaniem jest zastosowanie przemysłowego komputera PC.

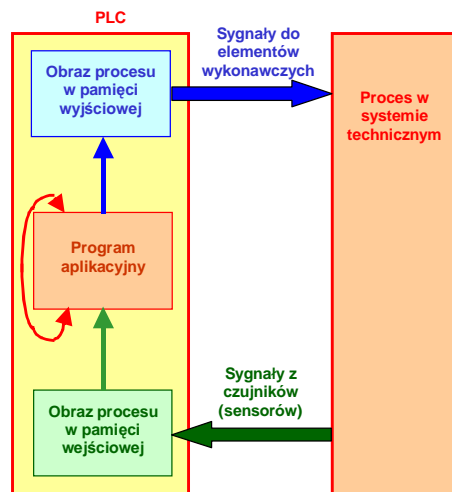
Zastosowanie sterowników komputerowych (np. PLC) w układach sterowania, w porównaniu z układami konwencjonalnymi (np. przekaźnikowo-stycznikowymi), ma następujące zalety:

- możliwość powtórnego wykorzystywania napisanych programów,
- modułowa i blokowa budowa programów, co skraca czas wykonania aplikacji,
- możliwość elektronicznego dokumentowania realizowanych aplikacji,
- możliwość nadzorowania i diagnostyki podczas przebiegu procesu,
- oszczędność czasu podczas wykonywania projektu układu sterowania i opracowywania programowania,
- duża niezawodność działania,
- prosta i szybka instalacja oraz małe gabaryty,
- niskie koszty budowy.



Rys. 5.1 Sprzętowe składniki sterowników PLC

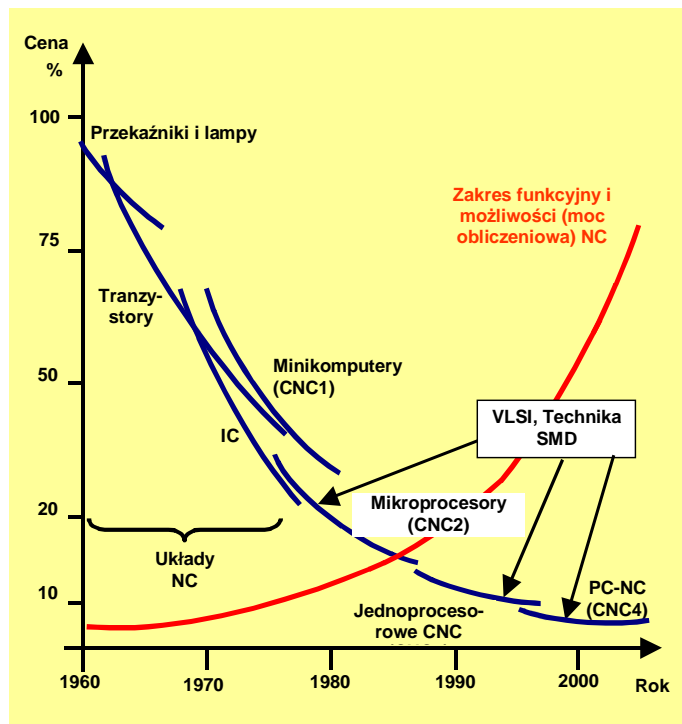
Na rys.5.1 pokazano budowę modułowego sterownika swobodnie programowalnego PLC. Do tego sterownika za pomocą modułów wejściowych są wprowadzane sygnały z sensorów. Sterownik cyklicznie realizuje program aplikacyjny związany z określonym obiektem (rys.5.2) i na podstawie stanu sygnałów wejściowych określa sygnały wyjściowe, które za pośrednictwem modułów wyjściowych są wyprowadzane do akuatorów.



Rys. 5.2 Cykliczna praca sterownika PLC

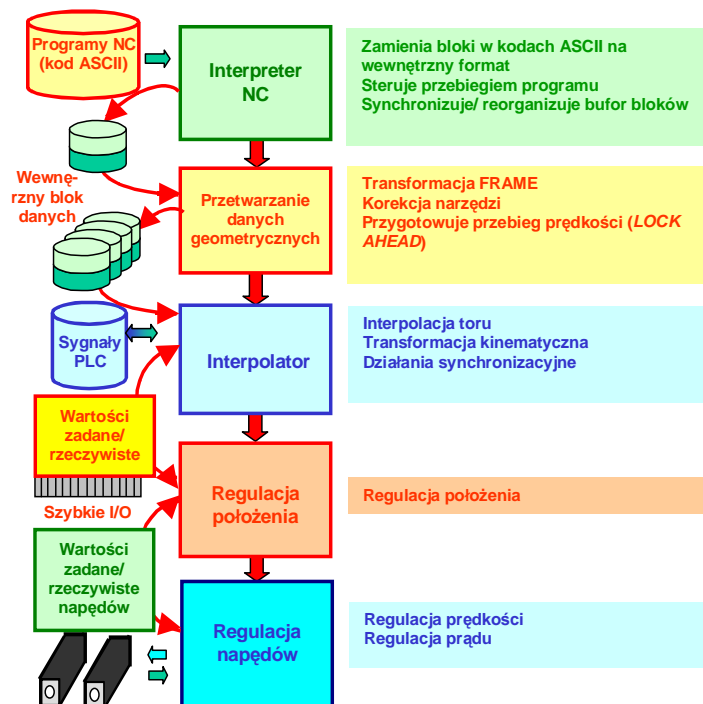
Drugim z istotnych rodzajów sterowników przemysłowych są układy sterowania numerycznego CNC, które są stosowane w obrabiarkach. Na rys. 5.3 pokazano rozwój techniki sterowania numerycznego NC/CNC. Wprowadzenie tej techniki spowodowało przełom w budowie obrabiarek, zwiększenie ich funkcjonalności i dokładności.

Przeływ informacji w układzie CNC pokazano na rys. 5.4. Do sterownika CNC wprowadzany jest program technologiczny NC, który służy do sterowania obrabiarką podczas obróbki przedmiotu.

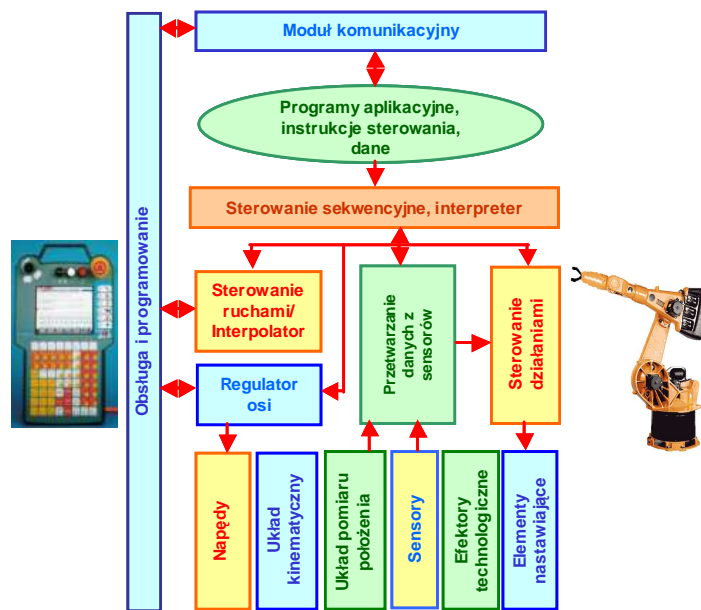


IC (ang. *Integrated Circuits*) SMD (ang. *Surface Mounted Devices*)
 VLSI (ang. *Very Large-Scale Integration*) PC-NC – układ CNC zintegrowany z PC

Rys. 5.3 Rozwój układów sterowania numerycznego NC/CNC



Rys. 5.4 Przepływ informacji w układzie CNC



Rys. 5.5 Składniki układu sterowania RC robota przemysłowego

Natomiast do sterowania robotów przemysłowych stosowane są sterowniki robotów RC (rys.5.5). Realizacja zadań manipulacyjnych i technologicznych za pomocą robotów przemysłowych wymaga opracowania programu aplikacyjnego, który jest następnie realizowany przez sterownik RC podczas pracy robota.

5. 2 Systemy operacyjne czasu rzeczywistego

Działanie sterowników przemysłowych, podobnie jak komputerów, wymaga zastosowania systemów operacyjnych. Pod kontrolą standardowych systemów operacyjnych (np. Windows) pracują komputery biurowe, a także np. graficzne panele operatorskie HMI (interfejsy człowiek-maszyna). Natomiast pod kontrolą systemów operacyjnych czasu rzeczywistego (np. Vx Works, OS-9) pracują komputerowe sterowniki przemysłowe (np. PLC), a także komputery przemysłowe i systemy wbudowane.

Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje systemów operacyjnych:

- standardowe systemy operacyjne:

- w tle wykonywane są dodatkowe programy (wygaszacz ekranu, skaner wirusów, ...),
- przerywania usług z urządzeń peryferyjnych (mysz, klawiatura, ...),
- nie można zapewnić determinizmu pracy.

systemy operacyjne czasu rzeczywistego RTOS (ang *Real Time Operating System*):

- system *Scheduling*'u zapewnia wykonywanie zadań o wysokim priorytecie,
- mają bezpośrednią kontrolę priorytetów,
- zadania o wyższym priorytecie wypierają *task*'i (procesy) o niskim priorytecie,
- urządzenia peryferyjne nie mogą przerwać algorytmów sterowania (regulacji),
- zapewniony jest determinizm pracy.

Pojęcie „czas rzeczywisty” lub konkretne dane dotyczące przebiegów czasu rzeczywistego dają się zdefiniować tylko w powiązaniu z określoną aplikacją. Jeżeli jej czasowe wymagania mogą być ściśle spełnione, to wtedy system – w odniesieniu do tej aplikacji – jest systemem czasu rzeczywistego. Również ważne jest to, że ma on

wyraźnie przewidywalne, zapewnione dla wszystkich warunków pracy przebiegi czasowe. Dla przebiegów czasowych systemu istotne są **cztery mierzalne kryteria**. Oprócz **czasu przebiegu, cyklu** lub **reakcji** należą do nich **Jitter, synchroniczność** oraz **przepustowość danych**.

W zależności od aplikacji istotną wielkością może być maksymalny czas transmisji informacji (czas przebiegu), zadana siatka czasowa (czas cyklu), lub czas pomiędzy zdarzeniem (sygnałem) i wynikającą z niego reakcją (czas reakcji). We wszystkich tych przypadkach wychodzi się z tego, że można podać pewną określoną górną granicę czasu, której w żadnym przypadku nie można przekroczyć przy realizacji wszystkich działań.

Często wychodzi się również z tego, że działanie nie powinno przekroczyć zadanego maksymalnego czasu, co nie stanowi problemu wtedy, gdy działanie (akcja) wymaga niewiele czasu. Istnieją jednak również takie aplikacje, w których reakcja musi nastąpić wewnątrz dokładnie zdefiniowanego okresu czasu, z możliwie małymi wahaniami pomiędzy poszczególnymi zdarzeniami. W takim przypadku istnieje wymaganie minimalnego *Jitter*'a, a zatem możliwie małego odchylenia od wartości zadanej.

Jeżeli różne działania różnorodnych urządzeń powinny być wykonane w jednakowym czasie, to występuje wymaganie dotyczące synchroniczności. Daje się to uzyskać albo za pomocą rozproszonych i synchronicznie pracujących zegarów, albo za pomocą centralnie zadawanego taktu synchronizacji, do którego są odnoszone wszystkie działania. Wielkością mierzoną jest tutaj dokładność synchronizacji. Ponadto pewną rolę ogrywa również ilość danych, którą należy wymieniać w zadanym czasie. Stanowi to specyficzne wymaganie przepustowości danych systemu komunikacyjnego.

Tryb czasu rzeczywistego jest takim działaniem systemu obliczeniowego, w którym programy są stale gotowe do wykonywania, dzięki czemu wyniki są uzyskiwane w określonym czasie. Dane mogą być dostarczane zarówno w sposób stochastyczny jaki i deterministyczny.

System czasu rzeczywistego jest takim systemem, w którym jest istotny czas uzyskiwania danych wyjściowych. Definicja czasu rzeczywistego: „**zdolność systemu operacyjnego do udostępniania usług w deterministycznie ograniczonym czasie odpowiedzi**”. Czas rzeczywisty nie oznacza szybkości, lecz określa dopasowaną czasowo do określonej aplikacji interakcję, tzn. odpowiedź na zewnętrzne lub wewnętrzne zdarzenie procesu (np. sygnał).

5. 3 Systemy wbudowane

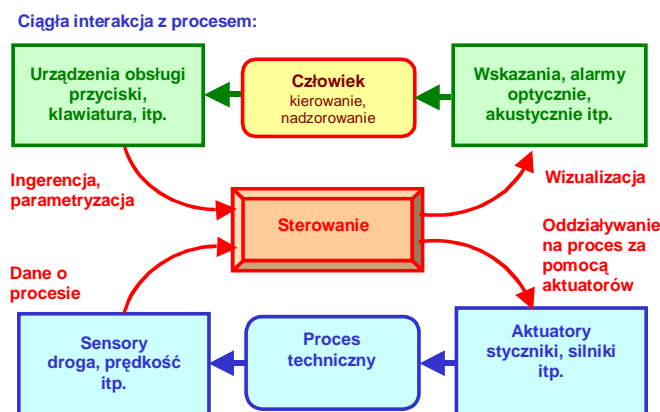
Często w systemach mechatronicznych „wbudowane” są mikroprocesory i mikrokontrolery, za pomocą których realizowane są zadania sterowania lub regulacji. Przykładem takiego rozwiązania jest nowoczesna pralka automatyczna, która zawiera wbudowany mikrokontroler służący do wybierania różnych programów prania. Obsługujący pralkę musi jedynie przy pomocy przełączników wybrać żądany program oraz dobrać parametry, a następnie uruchomić jego wykonanie. Nie musi on jednak programować samego mikrokontrolera.

Pojęcie **system wbudowany ES** (ang. *Embedded System*) jest używane dla obiektów ze wspomaganie mikroprocesorowym, w których do sterowania wzgl. regulacji stosowana jest funkcja lub szereg funkcji, ale bez ich programowania przez samego użytkownika. Programowanie układu mikroprocesorowego zostało wykonane

przez producenta maszyny (urządzenia), a poszczególne programy zostały zapisane w pamięci systemu i nie mogą już być przez użytkownika zmieniane. Zmieniane mogą być jedynie wartości parametrów występujących w tych programach. Dla systemu wbudowanego producent wykonuje pamięć ROM, która zawiera program. Jest to opłacalne tylko wtedy, gdy wymagana jest duża liczba takich *chip*’ów. Do wykonywania prototypów lub aplikacji o małych wymaganiach program może być ładowany do sprzętu użytkownika, tzn. pamięci EPROM/EEPROM.

Systemy wbudowane znajdują się w prawie wszystkich nowoczesnych obiektach technicznych, takich jak: samochody (np. asystent hamowania lub sterowanie dynamiki toru jazdy), samoloty, systemy kierowania ruchem (sygnalizacja świetlna), urządzenia medyczne, urządzenia telekomunikacyjne, instalacje sterowania produkcją i wiele artykułów konsumpcyjnych. Przejmują w nich one złożone zadania sterowania, regulacji i przetwarzania danych oraz dzięki dodatkowym własnościom zapewniają takim wyrobom przewagę konkurencyjną na rynku. Dlatego też systemy wbudowane należą do najszybciej rozwijającego się obszaru w informatyce stosowanej.

Na rys. 5.6 pokazano działanie systemu wbudowanego. Są to systemy reaktywne, tzn. ich działanie jest związane z występowaniem sygnałów, występuje w nich wiele asynchronicznych zdarzeń (sygnałów), muszą być spełnione twarde warunki czasu rzeczywistego, a także zapewnione wymagania bezpieczeństwa.



Rys. 5.6 Sposób działania systemu wbudowanego

W zależności od rodzaju zastosowania i związanych z nim aspektów kosztów struktura fizyczna systemów wbudowanych znacznie się zmienia. Rozciąga się ona od jednokładowych komputerów (cena ok. 1 EURO), które są stosowane w tanich artykułach konsumpcyjnych, takich jak np. zegary czy odtwarzacze, aż do komputerów przemysłowych stosowanych w liniach produkcyjnych. Pomimo dużych różnic w strukturze fizycznej wszystkie systemy wbudowane mają taką samą budowę logiczną. Zamiast tradycyjnego interfejsu człowiek-maszyna HMI, jaki jest stosowany w przypadku komputerów do ogólnego przetwarzania danych, w systemach wbudowanych występuje interfejs do otoczenia systemu technicznego. Oznacza to, że zamiast zwykłych urządzeń wprowadzania i wyprowadzania danych, takich jak klawiatura, monitor, głośniki itp., stosowane są **urządzenia sensoryczne**, za pomocą których system wbudowany określa własności otoczenia oraz **aktuatoryka**, za pomocą której ES realizuje oddziaływanie na swoje otoczenie. Urządzenia sensoryczne zawierają zwykle czujniki, które mierzą określone wielkości otoczenia, przy czym przekazywane przez nie informacje nie muszą być konieczne

zróżnicowanymi danymi pomiarowymi, takimi jak np. temperatura w °C, lecz mogą to być również najprostsze informacje dwustanowe, takie jak np. dostarczane przez termostat. Natomiast aktywność może się składać z dowolnego sterowanego przez wbudowany komputer członu nastawiającego (wykonawczego), takiego jak np. zawory elektromagnetyczne lub silniki krokowe.

Ponieważ właściwie różnica pomiędzy zwykłymi sterownikami komputerowymi do przetwarzania danych a systemami wbudowanymi zawiera się tylko w rodzaju interfejsu wprowadzania/ wyprowadzania, to wydaje się ona początkowo mało znacząca. Jednak ma ona daleko idące konsekwencje, także dla rozwoju oprogramowania. Ponadto, zamiast bardzo zróżnicowanych interakcji użytkownika, jakie występują w ogólnym przetwarzaniu danych, w systemach wbudowanych występuje tylko konieczność reakcji na mało zróżnicowane dane pomiarowe. Wymaga to zapewnienia systemowi wbudowanemu wystarczająco dokładnego wewnętrznego modelu swojego otoczenia, który pozwala mu na interpretację danych pomiarowych i wybór odpowiedniej reakcji. Do tego dochodzi jeszcze to, że użytkownik (człowiek) dysponuje znacznie elastyczniejszymi możliwościami reakcji niż otoczenie techniczne, dzięki czemu może on np. sensownie reagować na meldunki błędów, rozpoznawać zawieszenie się programu, a także tolerować spóźnioną reakcję systemu (nawet gdy tego nie chce). Jest to także związane z tym, że dostarczone wraz z masowymi wyrobami systemy wbudowane są trudne do korekcji (np. przez Internet), co powoduje szczególne wymagania dotyczące sprzętu, a zwłaszcza oprogramowania. Wreszcie muszą być uwzględnione wszystkie możliwe scenariusze występujące podczas zastosowania, tzn. każdy możliwy lub przynajmniej prawdopodobny ciąg interakcji pomiędzy układem technicznym i systemem wbudowanym. Każdy nieprzewidziany scenariusz może bowiem prowadzić do błędnego zachowania się systemu wbudowanego, co w następstwie może spowodować fatalne skutki dla zdrowia, życia lub środowiska.

Prawie wszystkie systemy czasu rzeczywistego RT (ang. *Real Time*) są systemami wbudowanymi, ale nie każdy system wbudowany jest systemem RT.

Typowe własności systemu RT (*Real Time*):

- **jest wbudowany** (ang. *embedded*): RT-(*Software*-)system jest składnikiem większego układu sprzętowo/ programowego i najczęściej steruje/ reguluje obiekt techniczny,
- **interakcja z zewnętrznym otoczeniem**: system RT współdziała z otoczeniem zewnętrznym, które najczęściej nie jest „człowiekiem” – sensory do nadzorowania środowiska systemu technicznego i aktywności do kontroli otoczenia,
- **jest reaktywny** (ang. *reactive*): systemy RT są często „napędzane” zdarzeniami i muszą reagować na zewnętrzną stymulację – odpowiedź/ reakcja jest często zależna od stanu (sygnału),
- **warunki czasowe** (ang. *timing constraints*): dane wejściowe/ zdarzenia muszą być przetworzone w zadanym (określonym) czasie; wymagana jest nie tylko poprawność realizacji zadań, ale także wykonanie ich we właściwym czasie,
- **współbieżność** (ang. *concurrent*): wiele działań jest wykonywanych albo rzeczywiście równocześnie (równoległe), albo są one czasowo powiązane,
- **rozproszenie** (ang. *distributed*): rozproszony system RT działa na wielu węzłach (procesorach), które są połączone siecią komunikacyjną.

Systemy wbudowane mają m.in. następujące własności:

- **system techniczny**, w którym wbudowany jest sterowany programowo układ obliczeniowy,
- układ obliczeniowy najczęściej **steruje, reguluje lub nadzoruje** proces techniczny,

- układ obliczeniowy najczęściej **nie jest widoczny z zewnątrz** (a zatem nie jest to PC z klawiaturą, monitorem, ...),
- systemy wbudowane najczęściej (na szczęście) **nie są swobodnie programowalne**,
- interfejsy użytkownika są często bardzo specyficzne albo nawet ich nie ma,
- **platforma rozwojowa** (ang. *development platform*) i **platforma docelowa** (ang. *target platform*) dla opracowania oprogramowania są właściwie zawsze różne,
- będące do dyspozycji **zasoby sprzętowe** (ang. *hardware*) są często bardzo ograniczone (przyczyna: koszty, zużycie energii, ciężar, ograniczone miejsce, ...).

Przykładami systemów wbudowanych są różnego rodzaju urządzenia i maszyny takie jak:

- sprzęt codziennego użytku: urządzenia kuchenne, odtwarzacze CD, aparaty fotograficzne i kamery, gry video,
- urządzenia peryferyjne komputerów: drukarka, modem,
- telekomunikacja: urządzenia transmisyjne, telefony komórkowe,
- wytwarzanie: obrabiarki, roboty przemysłowe,
- transport: samochody, pociągi, sygnalizacja świetlna,
- technika medyczna: tomograf komputerowy,
- automatyzacja produkcji.

Systemy wbudowane mają zastosowanie w takich obszarach:

□ **technika i środki transportowe:**

- systemy kierowania ruchem lądowym, morskim i lotniczym, takie jak lampy, elektroniczne tablice nad drogami, systemy parkowania, instalacje pozyskiwania informacji o ruchu, nastawniki, instalacje radarowe, radiowe układy namierzania i kierowania,
- samochody, pociągi, samoloty i statki, które zawierają różnorodne systemy wbudowane, np. sterowanie układami napędowymi, systemy *Fly-by-wire*, stabilizacja położenia samolotu, systemy zapobiegające blokowaniu hamulców i regulacji dynamiki toru jazdy, sterowanie poduszek powietrznych, blokowanie dróg jazdy, centralna blokada, sterowanie podnoszenia szyb, sterowanie światłem wewnętrznym, regulacja instalacji klimatyzacyjnej.

□ **technika komunikacyjna:**

- telefony komórkowe,
- urządzenia końcowe sieci stacjonarnych: telefon, fax, modem,
- urządzenia połączeń sieciowych.

□ **sprzęt gospodarstwa domowego:**

- kuchenki mikrofalowe, pralki, zmywarki do naczyń,
- zdalna obsługa,
- telewizory, radiobudziki, odtwarzacze CD, urządzenia satelitarne, odtwarzacze CD,
- konsole do gier, zabawki z efektami świetlnymi i dźwiękowymi,
- aparaty fotograficzne, kamery wideo.

□ **budynki:**

- sterowanie ogrzewaniem, sterowanie oświetleniem, centralne zamki, magistrale domowe,
- instalacje przeciwpożarowe i przeciwłamaniowe.

□ **technika ochrony środowiska:**

- sterowanie i nadzorowanie w elektrowniach,
- kontrola emisji.

□ **technika medyczna:**

- systemy dla pacjentów takie jak stymulatory serca, urządzenia słuchowe, funkcjonalne protezy,
- urządzenia medycyny ratunkowej, takie jak np. defibrylatory, urządzenia oddechowe,
- urządzenia pomiarowe, systemy diagnostyczne i systemy nadzorowania pacjentów, takie jak elektrokardiograf, elektroencefalograf, tomograf, monitor funkcji życiowych,
- urządzenia do naświetlania, urządzenia do terapii ruchowej.

Przyczynami stosowania systemów wbudowanych są:

- zwiększenie komfortu w prostych wyrobach (np. pralki automatyczne, itp.),
- zmniejszenie wielkości i masy (np. przenośny telewizor, itp.),
- zwiększenie mobilności (telefony, pagery, itp.),
- zwiększenie efektywności/ funkcjonalności (np. aparat fotograficzny w telefonie komórkowym, itp.),
- zwiększenie bezpieczeństwa (np. w samochodach ABS, ESP),
- zwiększenie możliwości pielęgnacji (np. jednostki diagnostyczne, itp.),
- zmniejszenie kosztów produkcji (mechanika jest zastępowana elektroniką),
- zmniejszenie zużycia energii (np. elektroniczna regulacja temperatury),
- personalizacja urządzeń.

Zatem **systemy wbudowane ES:**

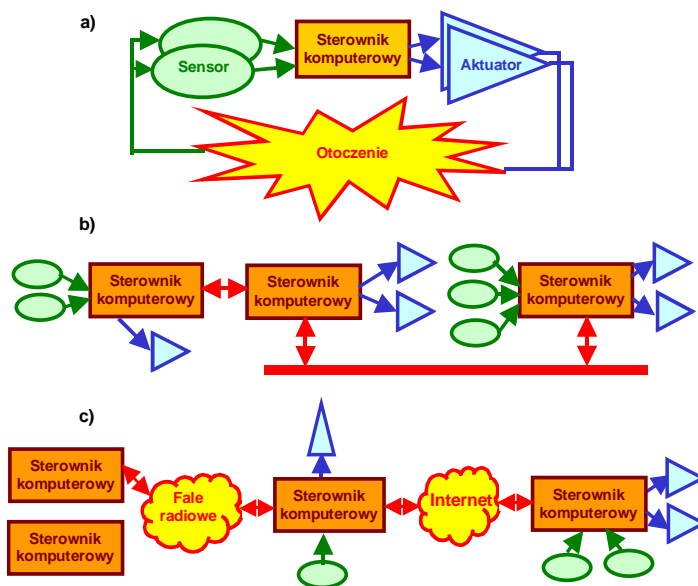
- **są to układy mikroprocesorowe stosowane w systemach technicznych** (np. samochodach, samolotach),
- **najczęściej są one ukryte oraz zwykle są reaktywnymi lub hybrydowymi systemami z wymaganiami czasu rzeczywistego,**
- **podlegają silnie ograniczającym warunkom brzegowym:**
 - minimalne zużycie energii,
 - minimalna wielkość (gabaryty),
 - minimalna masa,
 - minimalne koszty,
 - ...
- **przejmują zadania regulacji,**
- **mają wyższe wymagania dotyczące jakości i bezpieczeństwa,**
- **mają zdolność do pracy w czasie rzeczywistym oraz wysoką niezawodność.**

Znaczenie systemów wbudowanych:

- uzyskiwanie korzyści wynikających z konkurencji na rynku dzięki kombinacji oprogramowania i sprzętu (szybsza realizacja złożonych funkcji, ...),
- koszty wbudowanej elektroniki np. w nowoczesnym samolocie z 500 procesorami są większe niż 30%, z czego 80% przypada na oprogramowanie,
- udział kosztów w obszarze pojazdów (samochodów) jest podobny (obecnie do 100 procesorów),
- prawie 90% wszystkich elementów elektronicznych jest stosowanych w systemach wbudowanych,
- rynek procesorów w 2003 r.: 200 mln procesorów w komputerach PC i serwerach, 8 mld procesorów w systemach wbudowanych.

Rozróżnia się trzy rodzaje systemów wbudowanych (rys. 5.7):

1. zamknięte, lokalne systemy,
2. zamknięte, rozproszone systemy,
3. otwarte, rozproszone systemy.



Rys. 5.7 Rodzaje systemów wbudowanych: a - zamknięte, lokalne systemy, b- zamknięte, rozproszone systemy, c - otwarte, rozproszone systemy

W przypadku **zamkniętych, lokalnych systemów wbudowanych** (rys. 5.7a) sterownik komputerowy wykorzystuje wiele sensorów i aktuatorów, a system ma jedno (rzadko więcej) na stałe zdefiniowane zadanie. Typowymi własnościami takich systemów są:

- stała konfiguracja podczas pracy,
- najczęściej stałe wymagania,
- wysoka niezawodność,
- sterowanie zdarzeniami,
- praca w czasie rzeczywistym.

Natomiast typowymi przykładami tego rodzaju systemów wbudowanych są:

- sprzęt gospodarstwa domowego,
- sterowanie maszyn (urządzeń),
- urządzenia medyczne,
- elektronika domowa.

Zamknięte, rozproszone systemy wbudowane (rys. 5.7b) odznaczają się tym, że zawierają wiele sterowników komputerowych, które komunikują się przez dedykowane połączenia lub sieci miejscowe, a ponadto od czasu do czasu dochodzą w nich nowe aplikacje. Typowymi własnościami takich systemów są:

- do czasu pracy stała konfiguracja,
- od czasu do czasu dodatkowe wymagania,
- „graceful degradation” – fail safe,
- sterowanie zdarzeniami,
- praca w czasie rzeczywistym.

Natomiast typowymi przykładami tego rodzaju systemów wbudowanych są:

- sterowanie pojazdów,
- linie produkcyjne,
- sterowanie dźwigów osobowych (wind).

W przypadku **otwartych, rozproszonych systemów wbudowanych** (rys. 5.7c) zmieniające się urządzenia komunikują się przez dynamicznie tworzone połączenia

(np. przez Internet lub fale radiowe), a nowe aplikacje dają się instalować podczas pracy systemu. Typowymi własnościami takich systemów są:

- zmienna konfiguracja,
- szybko zmieniające się wymagania,
- niezawodna identyfikacja i pewne połączenia,
- elastyczność i odporność.

Natomiast typowymi przykładami tego rodzaju systemów wbudowanych są:

- Webcams,
- sieci Bluetooth,
- inteligentne sieci domowe,
- rozproszone aplikacje SmartCard.

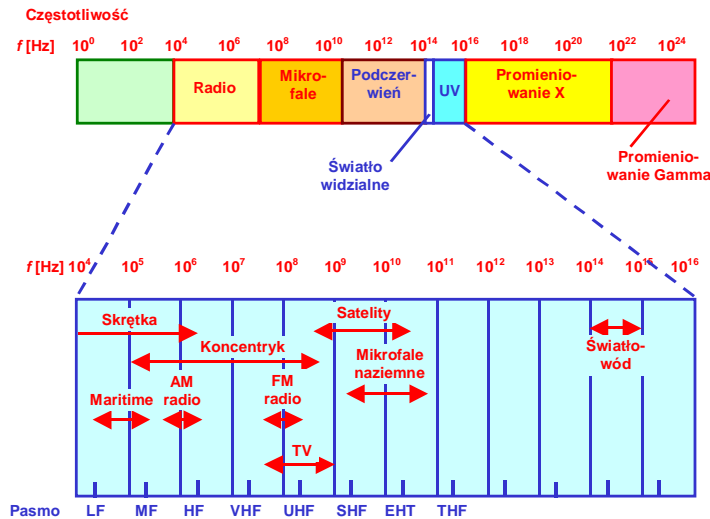
Istnieje kilkadziesiąt systemów operacyjnych wykorzystywanych w urządzeniach typu *embedded*, ale takich, które mają liczącą się na rynku pozycję jest tylko kilka. Najpopularniejsze z nich to Microsoft **Windows CE**, **Vx Works** firmy Wind River Systems i **Symbian** zaprojektowany przez Symbian Ltd. Te trzy systemy mają razem prawie 70% rynku. Wśród nich dominuje Microsoft Windows CE, który w 2005 r. miał blisko 30% udziału w rynku. Warto jednak pamiętać, że rynek RTOS jest pełen wyspecjalizowanych nisz, rządzących się własnymi prawami. O ile Microsoft ma niemal 30% całego rynku systemów wbudowanych, to w przypadku nowoczesnych telefonów komórkowych jest to już tylko 15%. W tej dziedzinie króluje Symbian, który instalowany jest w 67% tego typu urządzeń.

Rynek systemów *embedded* rozwija się niezwykle dynamicznie, głównie za sprawą urządzeń przenośnych. Nic więc dziwnego, że producenci systemów operacyjnych intensyfikują prace nad ulepszeniem swoich produktów, zwiększając ich niezawodność i minimalizując wymagania sprzętowe. Choć moc obliczeniowa i pamięć stają się z roku na rok coraz tańsze, to rosną również wymagania użytkowników i stopień złożoności urządzeń, a co za tym idzie - wymagania stawiane używanym systemom operacyjnym stają się coraz większe. Przykładem takiej ewolucji jest Windows CE.

6. Sieciowe systemy komunikacyjne

6.1 Wstęp

Istotną rolę w układach mechatronicznych spełniają sieciowe systemy komunikacyjne, które umożliwiają transmisję danych pomiędzy poszczególnymi składnikami. W transmisji danych wykorzystywane są fale elektromagnetyczne (rys.6.1).



Rys. 6.1 Fale elektromagnetyczne w transmisji danych

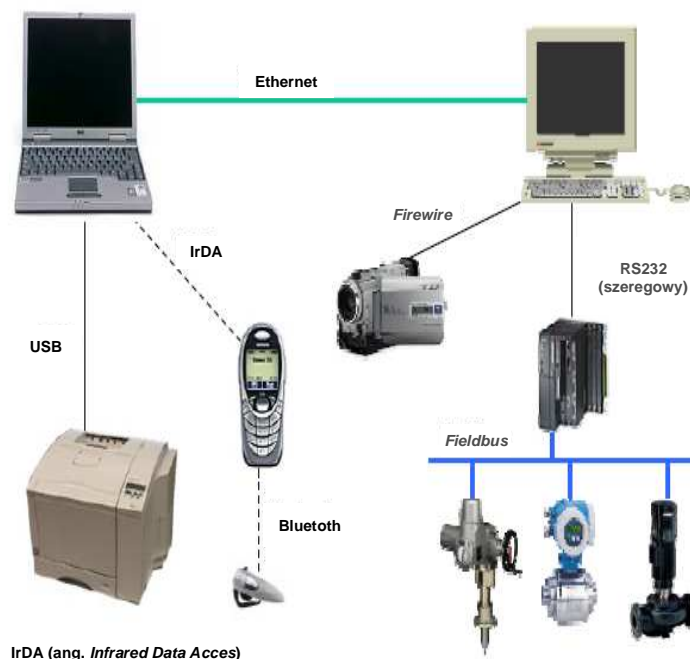
Nośnikiem fal elektromagnetycznych są media transmisyjne:

- **Związane z kablami:**
 - **transmisja elektryczna:**
 - skretka dwuparowa (ang. *Twisted Pair Kabel*),
 - kabel koncentryczny (ang. *Koaxial Kabel*),
 - **transmisja optyczna:**
 - światłowód (jedno- i wielomodowy).
- **Bezprzewodowe:**
 - **transmisja za pomocą fal radiowych:**
 - wykorzystanie nielicencjonowanych zakresów pasma,
 - wykorzystanie licencjonowanych zakresów pasma,
 - **transmisja za pomocą światła:**
 - promień lasera na średnie odległości,
 - podczerwień na małe odległości.

Komunikacja sieciowa jest stosowana w trzech głównych obszarach:

- automatyzacja w przemyśle: połączenie w sieć urządzeń (sensorów, aktuatorów, PLC, komputerów) w instalacjach przemysłowych (wytwarzanie, technika procesowa, elektrownie, itp.),
- środki transportu (samochody, samoloty): połączenie w sieć urządzeń sterowniczych (sterowników, komputerów), członów wykonawczych (aktuatorów), sensorów,
- automatyzacja budynków: połączenie w sieć urządzeń i instalacji w budynkach (ogrzewanie, oświetlenie, wentylacja, itp.).

W sieciowym systemie komunikacyjnym (magistrala szeregowy) wiele składników (urządzeń) elektronicznych dzieli się wspólnym medium transmisyjnym. Dane są transmitowane szeregowo w postaci bitów i mogą być w zasadzie odbierane przez wszystkich uczestników magistrali (ang. *Broadcasting*), określanymi także jako węzły sieci. W odróżnieniu od połączeń typu **punkt-z-punktem** nakłady związane z okablowaniem są tutaj znacznie mniejsze. Powoduje to zmniejszenie zarówno kosztów jak i ciężaru. Ponadto zwiększa się niezawodność całego systemu mechatronicznego, a jego projektowanie staje się bardziej przejrzyste. Na rys.6.2 pokazano przykład szeregowych systemów komunikacyjnych.



Rys. 6.2 Przykład szeregowych systemów komunikacyjnych

Magistrala (medium transmisyjne) ma wyraźną strukturę (topologię) taką jak: linia, pierścień czy drzewo i jest przeznaczona do przesyłania (transmisji) informacji. Przez magistralę określa się układ przewodów, w którym na zasadzie adresowania pracują różne urządzenia. W automatyzacji procesów często stosowane są standardowe magistrale, za pomocą których mogą pracować różne urządzenia i składniki (komponenty). Z medium transmisyjnym są związane następujące aspekty:

□ **Warunki fizyczne:**

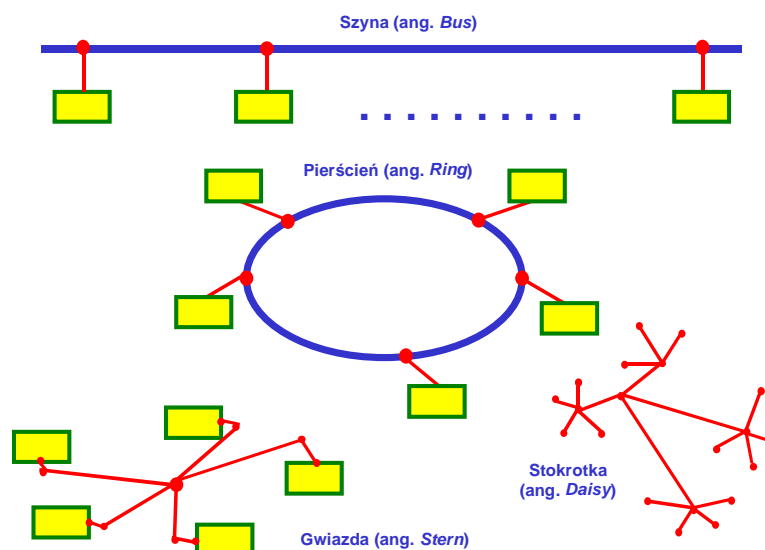
- zastosowanie odpowiednich metod, aby przez medium móc transmitować informacje.

□ **Topologia:**

- fizyczna struktura sieci (rys.6.3).

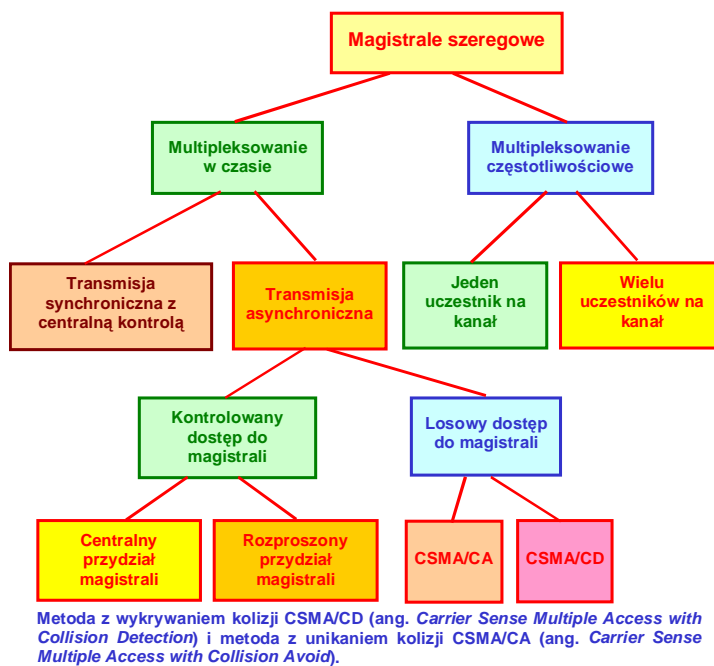
□ **Sterowanie dostępem do magistrali** (przy wspólnie wykorzystywanym medium):

- koordynacja wielu nadajników, aby uniknąć kolizji i tym samym zniszczenia informacji,
- rozwiązania dostępu:
 - równouprawniony (ang. *Fairness*),
 - z priorytetem.



Rys. 6.3 Topologie sieci komunikacyjnych

Na rys. 6.4 zamieszczono zestawienie metod dostępu do magistrali.



Rys. 6.4 Metody dostępu do magistrali

Terminem **mechanizmu sieciowego** określamy jest system komunikacyjny, który może mieć również złożoną strukturę z podsieciami, wieloma drogami transmisji lub różnorodnymi protokołami. Przez podsieci (segmenty) i urządzenia sieciowe z pamięcią może być równocześnie przesyłanych wiele informacji i wyrównywane różne szybkości transmisji.

W modelu komunikacji sieciowej typu *Client-Server* przez *Server*'y są oferowane informacje lub usługi. *Client* jest aktywny i wysyła żądanie na adres określonego *Server*'a. Następnie on (tzn. *Server*) dostarcza *Client*'owi odpowiedniej informacji lub

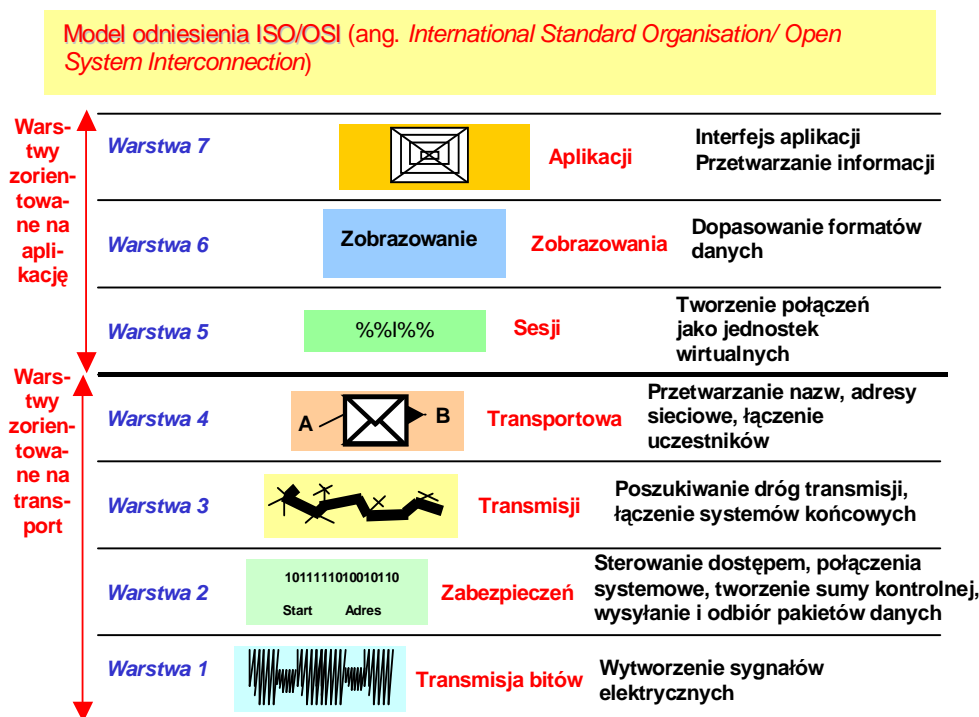
też wykonuje zażadana usługę. Zatem *Server* sam w sobie nie jest aktywny. Typowymi sieciami *Client-Server* są Intranet i Internet, które są oparte na protokole TCP/IP Ethernet'u.

W trybie pracy systemu komunikacyjnego *Master-Slave* urządzenie nadrzędne (*Master*) kontroluje działanie magistrali, natomiast przyłączone urządzenia podrzędne (*Slave's*) mogą tylko odpowiadać, gdy są one odpytywane. W rozwiązaniu *Multi-Master* możliwe jest rozpoczynanie komunikacji od różnych urządzeń. Jednak wówczas muszą być stosowane metody zapewniające udostępnianie magistrali wzgl. unikanie kolizji.

W sieciowych systemach komunikacyjnych występują m.in. takie pojęcia jak protokół i usługa. **Protokół** jest to znana liczba reguł i formatów, które są wykorzystywane do komunikacji pomiędzy procesami w celu wykonania określonego zadania. Natomiast **usługa** jest realizacja zdefiniowanego zadania, a usługobiorca i usługodawca komunikują się za pomocą określonego interfejsu.

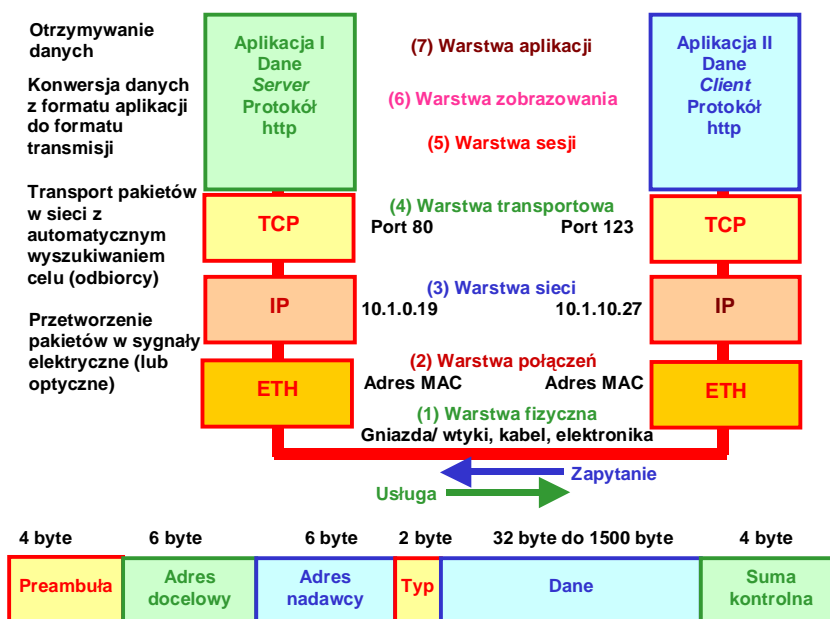
W zastosowaniach sieciowych systemów komunikacyjnych konieczne jest uwzględnienie m.in. następujących aspektów:

- tworzenie ramek (ang. *Framing*), czyli budowa wiadomości,
- adresowanie (tworzenie jednoznacznego przyporządkowania ramki i węzła sieci),
- dostęp do magistrali wzgl. utrzymanie warunków czasowych,
- ochrona danych wzgl. obsługa błędów oraz
- synchronizacja.



Rys. 6.5 Model warstwowy ISO/OSI

Podstawą rozwiązań sieciowych systemów komunikacyjnych jest 7-warstwowy model odniesienia ISO/OSI (rys.6.5). Dane w systemach sieciowych są transmitowane w postaci pakietów. Na rys. 6.6 pokazano przykład budowy pakietu IP (ang. *Internet Protocol*).



Rys. 6.6 Budowa (struktura) pakietu IP (ang. *Internet Protocol*)

6.2 Przykłady sieci komunikacyjnych

Miejscowe sieci komunikacyjne (ang. *Fieldbus*) zwykle łączą urządzenia sterujące (sterowniki, regulatory, komputery) bezpośrednio z czujnikami i aktuatorami. Różnią się one swoimi własnościami technicznymi i są stosowane tam, gdzie występują specjalne wymagania dotyczące obiektu (procesu), takie jak :

- liczba adresowanych urządzeń,
- system *Multimaster*, przy czym sterowanie przez magistralę może być przekazane z jednego urządzenia do innego,
- krótkie czasy reakcji wzgl. możliwość pracy w czasie rzeczywistym (deterministycznie),
- wysoka efektywność przesyłania pakietów przy krótkich informacjach,
- pakiety z dużą ilością danych,
- niezawodność transmisji,
- odporność na włamanie z zewnątrz sieci,
- wymiana urządzeń podczas pracy systemu (ang. *Hot Swap*),
- rozszerzalność (skalowalność),
- nakłady i koszty związane z okablowaniem,
- koszt przyłączanych układów,
- odporność (mechaniczna, elektryczna),
- dostępność wymaganych składników (sensorów, aktuatorów, urządzeń peryferyjnych),
- wsparcie techniczne, istniejące doświadczenia, rozpowszechnienie standardów,
- zasilanie urządzeń obiektowych (o małym poborze mocy, np. czujników) przez magistralę (przewody sygnałowe).

Protokół Hart (ang. *Highway Addressable Remote Transducer*) umożliwia transmisję sygnałów cyfrowych przez analogową pętlę prądową 4...20-mA, bez oddziaływania na sygnał analogowy. Na zmieniający się wolno sygnał analogowy jest nakładany sygnał o zmiennym napięciu. Dla wartości bitów 0 i 1 są do dyspozycji

dwie częstotliwości (2200 Hz i 1200 Hz). Ten protokół jest stosowany przede wszystkim wtedy, gdy do cyfrowej komunikacji powinno być wykorzystane istniejące już okablowanie analogowe. Może wówczas pracować wiele urządzeń z odpowiednimi własnymi adresami na jednym przewodzie z przełącznikiem (ang. *Multiplexer*) i adresowaniem.

Sieć MOD-Bus ma prosto programowalny protokół dla systemu *Master-Slave*. Do transmisji danych wykorzystywany jest interfejs RS-485.

Sieć CAN (ang. *Controler Area Network*, ISO 11898) została opracowana pierwotnie do zastosowania w samochodach osobowych w celu integracji składników. Następnie została ona rozszerzona jako **CANOpen** (Europa) wzgl. **DeviceNet** (USA) z odpowiednim oprogramowaniem do automatyzacji i jest często stosowana. Do transmisji jest wykorzystywany interfejs RS-485.

Sieć **Profibus** (EN 50 170) jest natomiast stosowana w większych instalacjach przemysłowych i do niezawodnej transmisji większych ilości danych. Jest ona rozpowszechniona głównie w Europie. Rozróżnia się trzy odmiany sieci Profibus:

- **Profibus PA** (do automatyzacji procesów, w obszarach zagrożonych wybuchem),
- **Profibus DP** (niem. *Dezentrale Peripherie*),
- **Profibus FMS** (ang. *Fieldbus Message Specification*). Do transmisji wykorzystywany jest interfejs RS-485. Ta odmiana jest wycofywana z zastosowań.
- **PROFInet** (*PROcess Field net*). Ta technika jest jeszcze nadal rozwijana i umożliwia ona włączenie w sieć, za pomocą Ethernet'u, poszczególnych elementów również na poziomie obiektowym (Ethernet do czujników i napędów). Można w niej nadal stosować istniejące już standardy (*Fieldbus*, OPC). Występujące problemy związane ze sterowaniem w czasie (ang. *Realtime*) są rozwiązywane przez podział sieci na segmenty i rozszerzenie do sterownika przez przełączniki sieciowe (ang. *Switche's*).

Sieć miejscowa (obiektowa) **ASI** (ang. *Aktuator-Sensor-Interface*) jest system komunikacyjnym, w którym poszczególne składniki (urządzenia) można przyłączyć bez stosowania narzędzi do elastycznego kabla (magistrali) z zasilaniem i komunikacją. Ostre kołki przebijają cienką izolację kabla i łączą się z odpowiednimi przewodami (połączenie na tzw. „wampirki”, bez użycia złączy z gniazdami wtykowymi). Sieć ta umożliwia przyłączenie sensorów i aktuatorów. Pojęciem **Ethernet** jest określany cały system techniczny, z którego zbudowane są zwykle lokalne sieci komputerowe LAN (ang. *Local Area Network*). Należą do niego np.:

- kabel,
- złącza (gniazda i wtyki),
- karty sieciowe w komputerze,
- przełącznik sieciowy (ang. *Switch*), który wyodrębnia segmenty sieci,
- *Router* (przejdźcie do innych sieci).

W pracy komputerowych sieci komunikacyjnych przyjęło się wiele standardów, np. dla:

- własności elektrycznych sygnałów (napięcia, szybkość transmisji),
- rodzaju kodowania (np. kod Manchester),
- metod dostępu (np. z rozpoznawaniem kolizji),
- budowy pakietów.

Jakie znaczenie ma zawartość pakietów i jak jest uzyskiwana niezawodna transmisja nie są tutaj określone. Dlatego też w jednej i tej samej sieci Ethernet mogą być wymieniane dowolne zawartości informacji w różnych protokołach (np. http, ftp, dstp). Za pomocą tylko jednorazowo występującego adresu dla każdego komputera daje się utworzyć połączenie transmisyjne. Jeżeli wymiana informacji powinna się

odbywać w obu kierunkach, to dla każdego protokołu w obu komputerach musi być zainstalowany serwer (program komputerowy), który ze swojej strony tworzy połączenie z programem aplikacyjnym (tutaj narzędzie wirtualne).

Aby Ethernet mógł być w sposób uniwersalny wykorzystywany w przemyśle, to taką możliwość daje m.in. jego niestandardowy wariant, w którym magistrala danych zapewnia również zasilanie urządzeń o małej mocy (**PoE: Power over Ethernet**). W sieciach bezprzewodowych **WLAN** (ang. *Wireless LAN*) kable miedziane (skrętka) lub światłowód są zastępowane przez fale radiowe. W ten sposób można uzyskać zasięg w terenie do 300-m, a w budynkach jest on znacznie mniejszy. Dane są przesyłane w protokole TCP/IP (ang. *Technical Communication Protocol/ Internet Protocol*).

6.3 Sieci komunikacyjne w samochodach

Zastosowanie sieci komunikacyjnych wynika ze wzrostu układów elektronicznych w samochodach:

- **Elektronika zamiast mechaniki:**
 - np. podnoszenie szyb, centralny zamek.
- **Elektroniczne urządzenia sterujące:**
 - silnik, skrzynia biegów, ABS, ESP, *Airbag*.
- **Składniki multimedialne:**
 - system nawigacyjny, odtwarzacz CD,
 - Internet.

Sieciowe systemy komunikacyjne umożliwiają:

- redukcję okablowania - maleje cena i ciężar,
- rozszerzenie zdolności komunikacyjnych,
- kontrolę dzięki składnikom diagnostycznym,
- zapewnienie bezpieczeństwa dzięki redundancji,
- modularyzację.

Rozwój i zastosowanie sieciowych systemów komunikacyjnych w samochodach przynosi następujące korzyści:

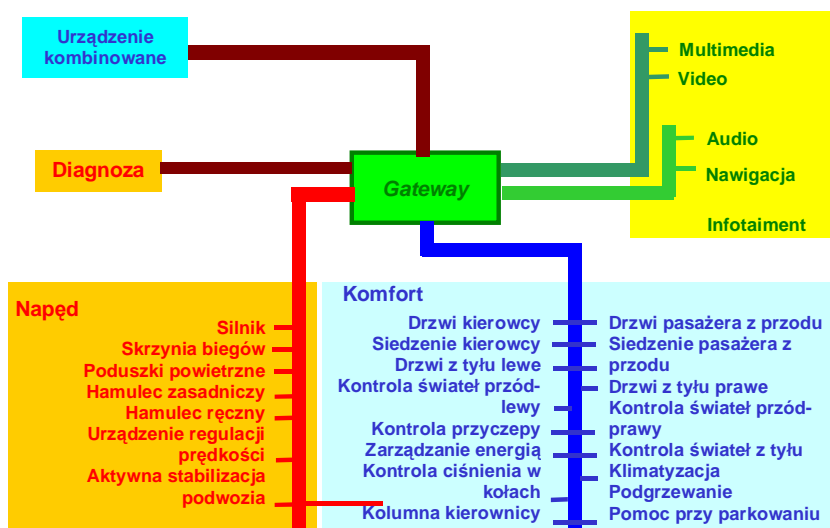
- zapewnienie komunikacji pomiędzy różnymi modułami i urządzeniami sterowniczymi z możliwie małymi nakładami na okablowanie,
- prosta struktura magistrali, tzn. każde urządzenie powinno być tylko raz przyłączone,
- zwiększenie odporności na awarie i zakłócenia dzięki redundantnym przewodom,
- zastosowanie prostych narzędzi diagnostycznych dzięki implementacji pamięci błędów w urządzeniu sterującym,
- oszczędność na kablach i tym samym również kosztach oraz masie samochodu,
- proste *Upgrade* nowego oprogramowania, zarówno podczas montażu jak i podczas pielęgnacji,
- przekształcenie samochodu w „*Mobile Office*“, integracja systemów nawigacyjnych, telefonu itp.,
- prosta integracja innych układów elektronicznych (np. asystent kierowcy).

Na rys.6.7 zamieszczono przykład zastosowania sieciowej struktury komunikacyjnej w samochodzie osobowym.

Sieciowe systemy komunikacyjne w samochodach są stosowane w celu redukcji nakładów związanych z okablowaniem, co stanowi istotny czynnik minimalizacji

kosztów wytwarzania i zmniejszenia masy samochodów. Technicznymi kryteriami doboru sieciowych systemów komunikacyjnych dla samochodów są:

- szerokość pasma przenoszenia (transmisji),
- odporność na zakłócenia,
- zdolność do pracy w czasie rzeczywistym,
- liczba adresowanych węzłów.



Rys. 6.7 Przykład sieciowej struktury komunikacyjnej w samochodzie osobowym

Rodzaj zastosowania sieci określa wymaganą szerokość pasma. Do transmisji komend dla nastawienia klap w instalacjach klimatyzacyjnych wymagana jest mała szerokość pasma, ale liczba adresowanych silników może być stosunkowo duża. Wymagania dotyczące odporności sieci na zakłócenia zależą od stopnia istotności bezpieczeństwa sterowanych jednostek. I tak dla jednostek, które służą wyłącznie funkcjom komfortu stawiane są mniejsze wymagania niż jednostkom, które mają bezpośredni wpływ na przebieg jazdy, takich jak ABS lub układy zapobiegające poślizgom. Najważniejszymi kryteriami ekonomicznymi w doborze sieciowych systemów komunikacyjnych dla samochodów są:

- koszty przewodów,
- koszty składników.

Ponadto istotnymi czynnikami w zastosowaniu sieciowych systemów komunikacyjnych w samochodach są:

- kompatybilność elektromagnetyczna (EMC),
- promieniowanie elektromagnetyczne,
- tolerancja napięcia zasilania,
- topologia okablowania.

Obecnie produkowane samochody średniej i wyższej klasy mają od 60 do 100 sterowanych elektronicznych urządzeń ECU (ang. *Electronic Control Units*). Sieci komunikacyjne stosowane w różnych obszarach samochodu mają zróżnicowane wymagania (tab.6.1).

Obecnie najbardziej rozpowszechnione sieciowe systemy komunikacyjne w samochodach to:

- **LIN** (ang. *Local Interconnect Network*),
- **CAN** (ang. *Controller Area Network*),

- **FlexRay**,
- **MOST** (ang. *Media Oriented Systems Transport*).

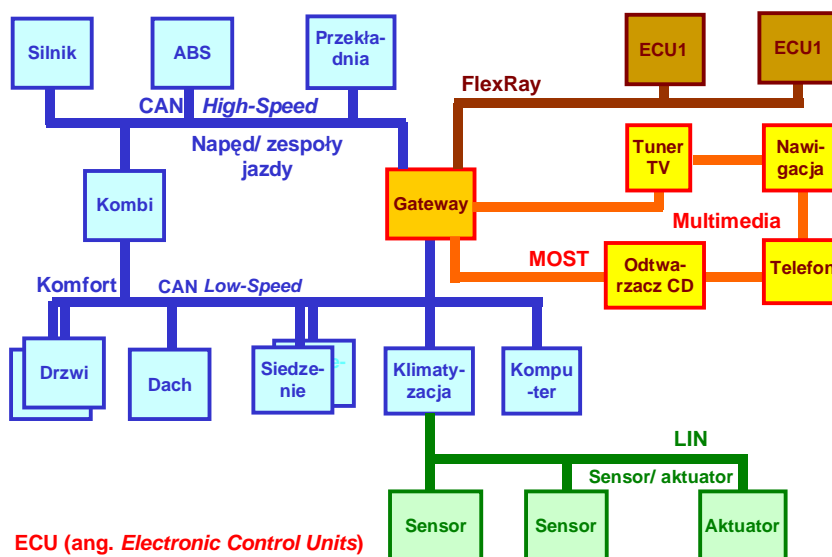
Tab. 6.1 Klasyfikacja różnych obszarów w samochodach

Klasa A	Klasa B	Klasa C	Klasa D
Elektronika z <i>chassis</i>	Armatura	Krytyczne systemy czasu rzeczywistego	Multimedia
Mało/ krótkie informacje	Wiele/ krótkie informacje	Częste, krótkie informacje	Częste, długie informacje
10 kbit/s	40 kbit/s	> 250 kbit/s	> 1 Mbit/s
Światła hamowania, kierunkowskazy, ...	Armatura, sterowanie klimatyzacją, ...	Sterowanie silnikiem, sterowanie skrzynią biegów, ABS, ...	Nawigacja, odtwarzacz CD, ...

Na rys.6.8 pokazano przykład rozwiązania systemu komunikacyjnego w samochodzie [3]. Nowoczesne samochody zawierają wiele różnorodnych systemów komunikacyjnych (magistral szeregowych). Najbardziej rozpowszechnionym sieciowym systemem komunikacyjnym w samochodach jest **CAN** (ang. *Controller Area Network*), który w 1994 r. został uznany jako standard międzynarodowy. Przy czym rozróżnia się:

- **wolny system CAN** (*CAN-Low-Speed*) do połączenia w sieć urządzeń sterujących komfortem z maksymalną szybkością transmisji 125 kbit/s oraz
- **szybki system CAN** (*CAN-High-Speed*) do połączenia w sieć urządzeń sterujących napędem i mechanizmów jazdy o maksymalnej szybkości transmisji 1 Mbit/s.

LIN (ang. *Local Interconnected Network*) jest stosowany do taniej i prostej transmisji danych w obszarze sensorów/ aktuatorów. Szybkość transmisji jest ograniczona do 20 kbit/s, co jednak zupełnie wystarcza do transmisji niekrytycznych czasowo sygnałów sensorów i aktuatorów.



Rys. 6.8 Przykład zastosowania sieci komunikacyjnych (magistrali szeregowych) w nowoczesnych samochodach

Ponieważ CAN, jako sterowany zdarzeniami szeregowy system magistralowy, przy rosnącym obciążeniu magistrali może w coraz mniejszym stopniu zapewnić

pracę w czasie rzeczywistym, to dla aplikacji krytycznych czasowo w samochodach konieczny jest taki sieciowy system komunikacyjny, który niezależnie od obciążenia magistrali zapewnia twardy czas rzeczywisty (ang. *Hard Real Time*). W systemach krytycznych czasowo chodzi najczęściej również o układy istotne dla bezpieczeństwa. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie systemu **FlexRay**, który ma maksymalną szybkość transmisji 20 Mbit/s i zapewnia deterministyczne przebiegi czasowe. Drugi kanał komunikacyjny umożliwia redundantną transmisję danych. W tym przypadku, gdy dane zostaną zakłócone w jednym kanale, to zawsze jest jeszcze dla nich do dyspozycji drugi kanał.

Natomiast urządzenia informacyjne, takie jak nawigacja, radio i telefon, wymagają stosunkowo wysokiej szerokości pasma, ponieważ transmitują one nie tylko sygnały sterujące, ale także sygnały wideo i audio. Do połączenia w sieć multimedialnych w samochodach stosowany jest system **MOST** (ang. *Media Oriented System Transport*). MOST daje do dyspozycji stosunkowo dużą szerokość pasma transmisji: dla częstotliwości próbkowania 48 kHz jest to ok. 23 Mbit/s dla transmisji strumienia bitów i 768 kbit/s do transmisji sygnałów sterujących.

Tab. 6.2 Cechy sieciowych systemów komunikacyjnych stosowanych w samochodach [3]

Aspekt	Sieć	CAN	LIN	FlexRay
Sterowanie		zdarzenia	czas	czas
Przebiegi czasowe		nie deterministyczne	deterministyczne	deterministyczne
Architektura		<i>Multi-Master</i>	<i>Master-Slave</i>	<i>Multi-Master</i>
Dostęp do magistrali		losowy CSMA/CA (ang. <i>Carrier Sense Multiple Access/ with Collision Avoidance</i>)	kontrolowany (delegowany <i>token</i>)	kontrolowany TDMA (ang. <i>Time Division Multiple Access</i>)
Adresowanie		informacje	informacje	informacje
Max. szybkość transmisji		1 Mbit/s	20 kbit/s	20 kbit/s
Max liczba byte'ów danych/ ramek (ang. <i>Frame</i>)		8	8	254
Medium transmisyjne		skrętka dwuparowa (ang. <i>Twisted Paar</i>)	<i>Single Wire</i>	skrętka dwuparowa, światłowód z tworzyw sztucznych
Topologia		linia, gwiazda	linia	linia, gwiazda

7. Interfejsy człowiek-maszyna

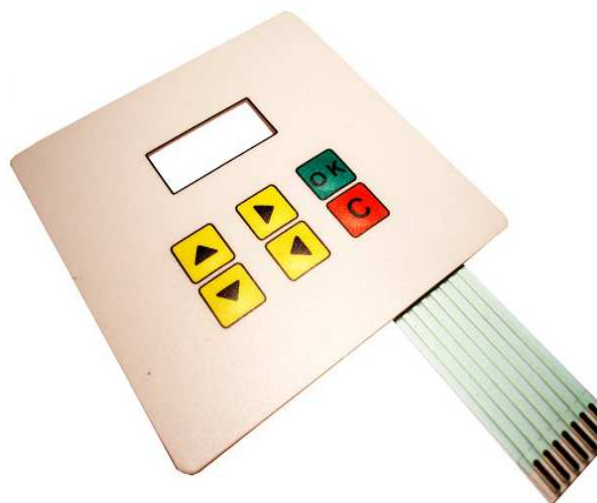
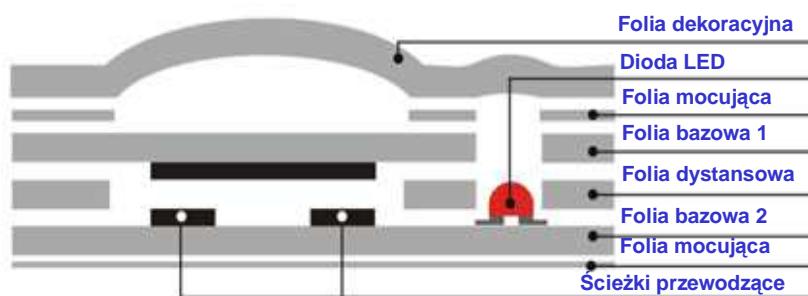
Istotnym składnikiem wyrobów mechatronicznych są interfejsy człowiek-maszyna HMI (ang. *Human-Machine Interface*). Umożliwiają one obsługę tych wyrobów w trybie interakcyjnym. Interfejsy HMI są dostosowane do wymagań określonego wyrobu i są one określane jako pulpity obsługi czy panele operatorskie. Służą one do wyświetlania informacji, wyboru funkcji sterowniczych, wprowadzania parametrów, itp. Budowa paneli operatorskich jest bardzo zróżnicowana. I tak w najprostszym przypadku mogą to być lampki (np. diody LED), przełączniki i przyciski. Coraz częściej jednak wykorzystywane są panele z ekranami dotykowymi i aktywnymi matrycami LCD, które pozwalają na zaawansowaną wizualizację danych oraz praktycznie intuicyjne sterowanie. Współczesne panele operatorskie umożliwiają prezentowanie różnorodnych danych i komunikację z użytkownikiem, który wcale nie musi być przeszkolonym operatorem. Tego rodzaju panele znajdują zastosowanie w różnego rodzaju maszynach i urządzeniach, a także w bankomatach, kioskach informacyjnych (POI) czy pojazdach. Oczywiście w wielu tych aplikacjach nie można mówić o typowym panelu operatorskim, ale o urządzeniu z wyświetlaczem wbudowanym w większą całość. Centralnym elementem obecnego panelu operatorskiego jest wyświetlacz ciekłokrystaliczny LCD, zwykle kolorowy. Dobre parametry i szeroka dostępność tych wyświetlaczy na rynku powodują, że wyświetlacze z matrycą aktywną wypierają z rynku starsze technologie, np. monochromatyczne lub pasywne LCD, nawet w takich zastosowaniach, gdzie kolorowe zobrazowanie nie jest konieczne lub wielkość ekranu nie ma dużego znaczenia. Wyjątkiem są najczęściej panele montowane w maszynach lub urządzeniach, w których konieczne jest przekazywanie jedynie prostych komunikatów. W przypadku paneli kolorowych zakres dostępnych wielkości ekranu pokrywa pełne spektrum potrzeb użytkowników, wahając się od małych wyświetlaczy 5-calowych, które przeznaczone są do aplikacji o ograniczonej potrzebie prezentacji, po duże wersje 20-calowe, umożliwiające jednoczesną prezentację bardzo wielu informacji. W ostatnim przypadku aplikacjami będą m.in. systemy sterowania w elektrowniach oraz na kolei. Duży ekran pozwala również na odczyt informacji ze znacznej odległości, na przykład w rozległych halach przemysłowych. Ponieważ wzrost popularności dużych modułów LCD w zastosowaniach konsumenckich przekłada się na ogólny spadek ich cen, to również w automatyce coraz częściej spotkać można panele operatorskie z dużymi, kolorowymi ekranami. Od paru lat wyraźnym zjawiskiem jest dążenie producentów do minimalizacji mocy pobieranej przez panel operatorski. Dotyczy to szczególnie procesora, a celem tych działań jest przede wszystkim realizacja chłodzenia pasywnego, bez konieczności użycia wentylatorów. Rezygnacja z tych elementów wynika zarówno z ich niewielkiej trwałości, jak też z faktu, że strumień powietrza przepływający wewnątrz urządzenia sprawia wiele kłopotów. Niski pobór mocy sprzyja zapewnieniu wysokiej odporności na czynniki środowiskowe, gdyż pozwala zamknąć panel w stosunkowo szczelnej obudowie, gdzie rozpraszanie ciepła dokonywane jest w dużej części za pomocą przewodzenia ciepła przez ścianki obudowy, bez konieczności wykonywania dodatkowych otworów. Dlatego w wielu nowoczesnych panelach operatorskich nie spotyka się już chłodzenia wymuszonego za pomocą wentylatorów, przynajmniej jeśli chodzi o wersje przeznaczone do pracy w typowym zakresie temperatur.

Na rys. 7.1 pokazano wymagania dotyczące paneli operatorskich. Wiele z tych wymagań jest podobnych do tych, jakim podlegają także inne urządzenia automatyki (np. sterowniki). W przypadku wyrobów produkowanych w większych ilościach

zamiast wykorzystania paneli oferowanych na rynku opłacalne jest zaprojektowanie i wykonanie specjalnego panelu operatorskiego, który jest dostosowany do potrzeb obsługi tego wyrobu. Taki panel może np. zawierać klawiaturę membranową (rys.7.2).



Rys. 7.1 Wymagania dotyczące interfejsów HMI



Rys. 7.2 Budowa i przykład klawiatury membranowej

Na rys. 7.3 pokazano przykłady prostych paneli tekstowych, które zawierają wyświetlacz ciekłokrystaliczny oraz klawisze. Tego rodzaju panele są stosunkowo tanie, zapewniają pełną obsługę interakcji z użytkownikiem przez sterownik (np. PLC), zawierają proste protokoły komunikacyjne (np. terminalowy), a wyświetlane na ekranie teksty są zawarte w pamięci sterownika, co obciążają jego pamięć. Natomiast na rys.7.4 pokazano przykłady zaawansowanych tekstowych paneli operatorskich.



Rys. 7.3 Przykłady prostych terminali tekstowych

Odnaczają się one tym, że:

- mają oddzielone funkcje HMI od sterownika (np. PLC),
- pamięć projektu jest zawarta w panelu HMI,
- jest dostarczane firmowe oprogramowanie narzędziowe do programowania paneli,
- mają ładowalne *driver*'y komunikacyjne dla wielu sterowników,
- mają możliwość opracowania interfejsu wielojęzycznego,
- możliwa jest obsługa drukarki.



Rys. 7.4 Zaawansowane tekstowe panele operatorskie

Na rys.7.5 zamieszczono przykłady graficznych paneli operatorskich. Monitory tego rodzaju paneli mogą być czarno – białe (monochromatyczne) lub kolorowe i oprócz wyświetlania informacji tekstowych, umożliwiają one wyświetlanie grafiki (np. wykresy i trendy). Panele takie mogą być także dotykowe (ang. *Touch Screen*)

i wówczas nie jest potrzebna klawiatura (klawisze). Producenci takich paneli dostarczają także oprogramowanie narzędziowe z bogatą biblioteką gotowych elementów graficznych, co ułatwia opracowanie aplikacji panelu do obsługi kreślonego obiektu.



ESA VT585W



Mitsubishi MAC E700

Rys. 7.5 Przykłady graficznych paneli operatorskich

Natomiast na rys.7.6 pokazano przykłady komputerów panelowych. Tego rodzaju panele odznaczają się tym, że:

- mają standardowy system operacyjny (np. Windows),
- są łatwe w obsłudze,
- możliwe jest uruchomienie standardowych aplikacji,
- są łatwe w dołączeniu do dowolnego układu sterowania,
- jest łatwa rozbudowa funkcjonalności,
- jest łatwa integracja z innymi systemami informatycznymi (np. w przedsiębiorstwie).



Siemens PCU50



Beckhoff

Rys. 7.6 Przykłady komputerów panelowych

Tego rodzaju panele operatorskie są stosowane m.in. w budowie obrabiarek sterowanych numerycznie CNC.

W niektórych maszynach (np. wielkogabarytowych obrabiarkach), oprócz stacjonarnych paneli operatorskich o pełnej funkcjonalności stosowane są dodatkowo mobilne (przenośne) panele z ograniczonym zakresem funkcji obsługowych tzw. „wędki” (rys.7.7).



Mobile View Guard
Terminal G750



Siemens
Mobile Panel 170



Wonderware Tablets



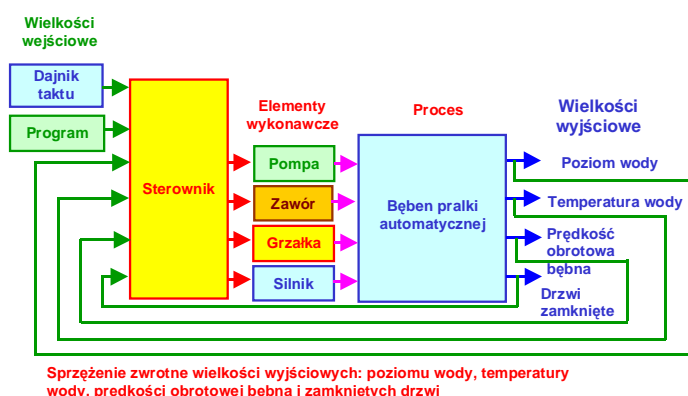
Mobile View Tablet Terminal T750

Rys. 7.6 Przykłady komputerów panelowych

Tego rodzaju panele mogą być przewodowe lub bezprzewodowe („wędki”) oraz powinny być odporne na wstrząsy i upadki.

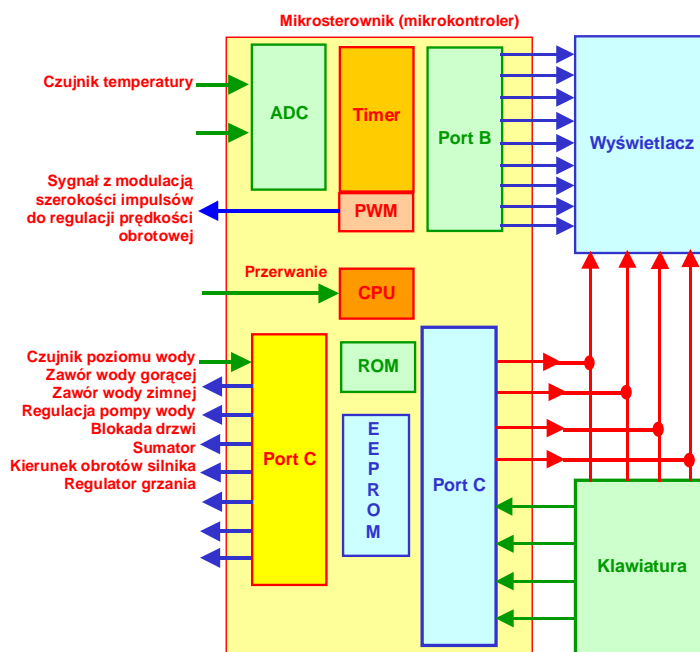
8. Przykłady wyrobów mechatronicznych

We wcześniejszych rozdziałach skryptu zamieszczono już przykłady wyrobów mechatronicznych. Natomiast teraz niektóre z takich wyrobów zostaną bliżej rozpatrzone. Jednym z powszechnie używanych sprzętów gospodarstwa domowego są pralki automatyczne. Wcześniej produkowane pralki automatyczne były wyposażane w programator elektromechaniczny (rys.8.1), a zatem nie odpowiadały one w pełni obecnemu rozumieniu systemów mechatronicznych, których istotnym elementem jest oprogramowany sterownik komputerowy [1].



Rys. 8.1 Pralka automatyczna z programatorem elektromechanicznym

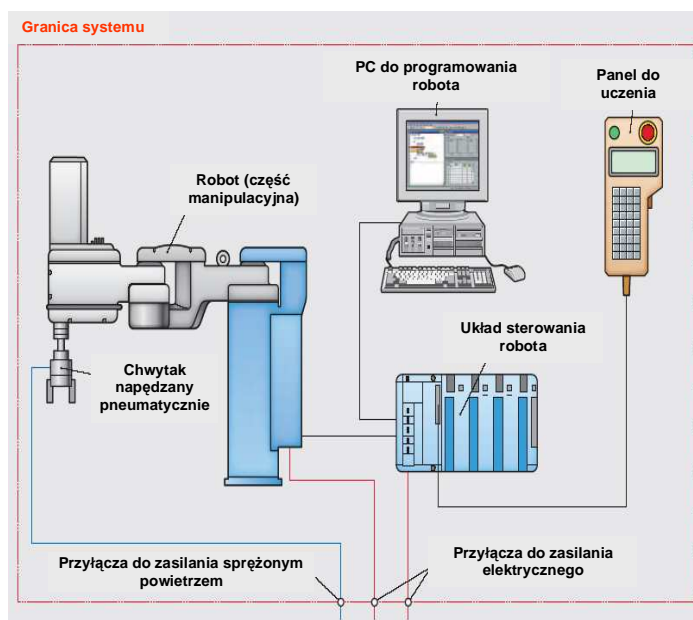
Natomiast na rys. 8.2 pokazano przykład schematu blokowego współcześnie produkowanych pralek automatycznych.



Rys. 8.2 Pralka automatyczna ze sterowaniem mikrokomputerowym

Często stosowanym w praktyce sterownikiem jest mikrokontroler Motorola M68HC11 [1]. Sygnały wejściowe temperatury wody i prędkości obrotowej są wprowadzane przez przetwornik analogowo-cyfrowy ADC. Port A dostarcza sygnałów wyjściowych do różnych aktuatorów oraz przyjmuje sygnał wejściowy o poziomie wody. Port B wyprowadza sygnały do wyświetlacza. Natomiast port C wyprowadza sygnały wyjściowe do wyświetlacza oraz przyjmuje sygnały wejściowe z klawiatury, za pomocą których określone są różne programy.

Dobrym przykładem wyrobu mechatronicznego jest także robot przemysłowy (rys.8.3). Robot przemysłowy jest swobodnie programowalną maszyną manipulacyjną, która jest przeznaczona do manipulowania materiałami, przedmiotami, narzędziami lub specjalistycznymi urządzeniami na podstawie różnych, uprzednio zaprogramowanych przebiegów ruchu, aby zrealizować szereg zadań (np. technologicznych).



Rys. 8.3 System robota przemysłowego

Ewolucję mechatroniczną dobrze ilustruje przykład rozwoju konstrukcji samochodu. I tak do lat 60. XX w. jedynym urządzeniem elektronicznym w samochodzie było radio, a wszystkie inne funkcje były realizowane całkowicie mechanicznie lub elektrycznie (np. rozrusznik i układ ładowania akumulatora). Poza zderzakami i elementami konstrukcji nadwozia nie było także żadnych „inteligentnych systemów bezpieczeństwa” do ochrony pasażerów podczas wypadku. Pasy przy siedzeniach, wprowadzone na początku lat 60. XX w., miały na celu poprawienie bezpieczeństwa pasażera i działały całkowicie mechanicznie. Wszystkie systemy silnika były sterowane przez kierowcę i/lub inne mechaniczne układy sterowania. Do sterowania zapłonem używany był rozdzielacz mechaniczny, a sterowaną zmienną była chwila zapłonu. Mechanicznie sterowany proces zapłonu nie był optymalny z punktu widzenia sprawności spalania i zużycia paliwa. Dlatego też elektroniczny układ zapłonowy był jednym z pierwszych układów mechatronicznych, które zostały wprowadzone do samochodów pod koniec lat 70. XX w. Układ ten składa się z sensora położenia wału korbowego, sensora pozycji wałka krzywkowego, sensora

przepływu powietrza, sensora pozycji przepustnicy, sensora zmiany pozycji przepustnicy oraz specjalistycznego mikrokontrolera, określającego chwilę zapłonu. Pierwsze wdrożenia elektronicznego zapłonu zawierały tylko sensor Hall'a do dokładnego wykrywania pozycji wałka rozdzielacza. Natomiast kolejne wdrożenia całkowicie wyeliminowały rozdzielacz i bezpośrednio sterowały zapłonem za pomocą mikroprocesora.

System przeciwdziałający blokowaniu kół podczas hamowania (ABS) został również wprowadzony pod koniec lat 70. XX w. System ABS wykrywa zablokowanie jednego z kół i poprzez modulowanie ciśnienia hydraulicznego w układzie hamulcowym, powoduje zminimalizowanie lub wyeliminowanie poślizgu koła i dzięki temu utrzymanie przyczepności niezbędnej do skręcania samochodem.

Kolejnym przykładem układu mechatronicznego w samochodach jest automatyczna stabilizacja toru jazdy (niem. ESP, ang. VDC), który został wprowadzony pod koniec lat 90. XX w. W układzie ESP wykorzystywane są m.in. sygnały z sensora tempa obrotu samochodu dokoła osi pionowej i sensora przyspieszenia poprzecznego, a zamiary kierowcy są określane przez pomiar pozycji koła kierownicy. Przez porównanie tej pozycji z rzeczywistym kierunkiem ruchu samochodu układ ESP uruchamia takie terowanie dostarczaniem momentu napędowego do kół oraz sterowanie prędkością pojazdu, aby zminimalizować różnicę między kierunkiem skrętu kierownicy i rzeczywistym kierunkiem ruchu pojazdu.

Wszystkie zasadnicze innowacje w budowie samochodów w ostatnich dwudziestu latach nie byłyby możliwe bez zastosowania elektroniki. Pomimo osiągniętego już wysokiego stopnia rozwoju nadal konieczne jest zwiększanie bezpieczeństwa i niezawodności samochodów. Podstawową rolę w samochodach, np. w sterowaniu i regulacji silników, odgrywa mechatronika. Realizacja takich systemów bezpieczeństwa jak poduszki powietrzne, ABS i ERP nie jest możliwa bez zastosowania elektroniki. Dopiero zastosowanie elektronicznych systemów zarządzania umożliwiło uzyskanie znaczących innowacji w silnikach wysokoprężnych oraz związaną z tym istotną redukcję zużycia paliwa i szkodliwych składników gazów. Natomiast systemy zapewnienia komfortu, takie jak np. nawigacja GPS lub zarządzanie klimatyzacją, są w swojej funkcjonalności silnie uzależnione od elektroniki i oprogramowania.

Tab.8.1 Systemy mechatroniczne w pojazdach

Napęd	Komfort	Aktywne bezpieczeństwo	Bierne bezpieczeństwo
- elektroniczna regulacja silnika, - zmienna praca zaworów, - automatyczna przekładnia, - blokada mechanizmu różnicowego, - regulowane przełożenie (sprzęgło Haldex), - ...	- elektryczne ustawianie siedzeń, - automatyczna klimatyzacja, - bezkluczykowy system zamykania drzwi, - pomoc podczas parkowania, - autonomiczne parkowanie, - system asystenta kierowcy, - ...	- układ kierowniczy (hydrauliczny/ elektryczny), - system regulacji zapobiegający poślizgom - program stabilizacji toru jazdy - asystent hamowania - elektroniczny hamulec parkowania - adaptacyjne tłumienie - aktywna stabilizacja przechyłów - adaptacyjne oświetlenie- ...	- poduszki powietrzne - pasy bezpieczeństwa - aktywne pasy - bezpieczeństwa - system ochrony pasażerów - ...

Zastosowanie układów półprzewodnikowych w samochodach w ostatnich latach uległo znacznemu wzrostowi. W przyszłości przewiduje się, że:

- 90% innowacji w samochodach i ich funkcjonalność będzie związanych z mechatroniką,
- w 2010 r. ok. 40% wartości dodanej w samochodach będzie związane z mechatroniką,
- już obecnie udział elementów elektronicznych w kosztach wytwarzania samochodów wynosi od 20 do 30%,
- nowe rozwiązania i ulepszenia, takie jak np. systemy *X-by-wire* będą możliwe dopiero przez zastosowanie mechatroniki.

W tab.8.1 zamieszczono zestawienie systemów mechatronicznych stosowanych w samochodach.

Systemy mechatroniczne w samochodach przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa oraz optymalizacji pracy silnika i zużycia paliwa. Umożliwiają one również nowe usługi, w których wykorzystuje się połączenie telekomunikacji i informatyki (telematyki), np. zdalną diagnostykę w przypadku awarii lub znalezienie skradzionych pojazdów.

Ważnym argumentem za stosowaniem systemów mechatronicznych w samochodach są także koszty. Odzworowanie funkcji w oprogramowaniu jest bowiem znacznie korzystniejsze, aniżeli opracowanie i wytworzenie zespołu mechanicznego. Ponadto zastosowanie elektroniki i oprogramowania pozwala na zaoszczędzenie miejsca i umożliwia większe zagęszczenie funkcji. Ponieważ cykle rozwojowe dla elektroniki i oprogramowania są krótsze niż dla zespołów mechanicznych, to nowe funkcje można szybciej i zaimplementować jeszcze w już zaawansowanym stadium rozwoju całego samochodu i tym samym elastycznie reagować na zapotrzebowanie rynku. Dlatego też wszyscy producenci nastawiają się na to, że w samochodach jest coraz więcej techniki komputerowej.

Pewnym problemem w rozwoju systemów mechatronicznych stosowanych w samochodach, oprócz ogólnie akceptowanego systemu operacyjnego, jest jeszcze brak modułów programowych dla określonych funkcji, które mogłyby być przenoszone z jednego modelu samochodu na inny. Samo oprogramowanie w modelach samochodów tych samych producentów różni się często od siebie w zależności od tego, jakie komponenty i systemy dostarczył kooperant dla każdorazowych zespołów. Dlatego też konieczne jest opracowanie jednolitej platformy dla rozwoju oprogramowania, która umożliwi zdefiniowanie i budowę modułów programowych, które mogą być wielokrotnie wykorzystywane. Jednak niewątpliwie trudniejszą sprawą aniżeli standaryzacja oprogramowania jest lepsze powiązanie ze sobą elementów mechanicznych, elektryczno/elektronicznych i oprogramowania. Problemem jest tutaj to, że zespoły mechaniczne, składniki elektryczne i elektroniczne oraz oprogramowanie są opracowywane w różnych działach i organizacjach, które nie pracują według jednakowych procesów. Cykle innowacyjne i cykle życia opracowanych przez nie komponentów mają różną długość, co utrudnia uzyskanie przejrzystego zarządzania wersjami i zmianami. Rozwijający zespoły mechaniczne, elektryczne i elektroniczne oraz oprogramowanie tworzą i zarządzają swoimi danymi dotyczącymi wyrobów w różnych systemach IT (ang. *Information Technology*), pomiędzy którymi często nie ma nawet interfejsów, aby można było wymienić informacje dotyczące wersji i zmian.

Literatura

1. Bolton W., Bausteine mechatronischer Systeme, Pearson, 2006. Bernstein H., Mechatronik in der Praxis, VDE, 2007.
3. Serielle Bussysteme, Elektronik Industrie, 06/2006.
4. Podstawy mechatroniki, REA, 2006.
5. Mechatronika, REA, 2002.