

Marek Gawrysiak

Mechatronika
i
projektowanie mechatroniczne

Wprowadzenie

Białystok 1997

**Wydanie publikacji dofinansowane
przez Komitet Badań Naukowych**

Recenzenci:

prof. nadzw. dr hab. inż. Bogdan Branowski

prof. nadzw. dr hab. inż. Tadeusz Uhl

Opracowanie redakcyjne – Jadwiga Żukowska

Skład komputerowy i rysunki – Marek Gawrysiak

Korekta – Marek Gawrysiak

ISSN 0867-096X

Drukowano w Dziale Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej. Nakład 500 egz. Ark. wyd. 7,0. Ark. druk. 8,0. Format B5. Oddano do druku we wrześniu 1997 roku. Druk ukończono w październiku 1997 roku. Zam. 101/97.

Przedmowa

Bezprecedensowy rozwój techniki mikroprocesorowej doprowadził do nowego spojrzenia na procesy przepływu informacji w maszynach. Zalety mikroprocesora – olbrzymie możliwości obliczeniowe, łatwość programowania, miniaturowe rozmiary, coraz niższa cena – spowodowały, że zaczęto go wykorzystywać do sterowania maszyn. Tak narodziła się mechatronika – interdyscyplinarny obszar nauk technicznych, próbujący zintegrować mechanikę, budowę maszyn, automatykę, elektrotechnikę, elektronikę i technikę komputerową. Dziś trudno sobie wyobrazić nowoczesną maszynę bez mikroprocesora. Stał się on standardowym elementem maszyny, takim jak łożysko, sprzęgło, przekładnia itp.

Mechatronika pokazuje jak integrować klasyczne urządzenia mechaniczne ze sterowaniami mikroprocesorowymi (komputerowymi). Zajmuje się badaniem i rozwojem nowych zintegrowanych systemów mechaniczno-elektronicznych, które wykazują się pewnym stopniem „inteligencji”, polegającej przede wszystkim na samodzielności podejmowania decyzji. Układ (system) mechatroniczny jest w stanie – za pomocą czujników (sensorów) – odbierać ze swego otoczenia sygnały; przetwarzać je za pomocą mikroprocesora i, na tej podstawie, reagować – za pomocą elementów wykonawczych (aktorów) – odpowiednio do sytuacji. Przez to jest elastyczny i może być stosowany w różnorodnych zadaniach. Chodzi więc o programowalne urządzenia i systemy mechaniczne z sensoryką, aktoryką i komunikacją.

Podstawowym celem mechatroniki jest optymalne sterowanie ruchem urządzeń mechanicznych. Osiąga się to przez: (1) fizyczne integrowanie mikroelektroniki z częściami mechanicznymi oraz (2) podział urządzenia na moduły, które realizują funkcje częściowe. Mechatronika oferuje konstruktorom nowy sposób realizacji tych modułów: nie muszą one mieć tradycyjnej postaci mechanicznej, lecz mogą być rozwiązaniem mechatronicznym – z sensorami, aktorami i sterowaniem mikroprocesorowym.

Skąd się wzięła ta monografia?

U źródeł tej monografii leżała potrzeba unowocześnienia kształcenia na wydziałach mechanicznych wyższych szkół technicznych. Potrzeba ta przed pięcioma laty była jednym z powodów zaangażowania się autora w utworzenie kierunku studiów „automatyka i robotyka” na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Doprowadziło to do „odkrycia” mechatroniki i zainteresowania się nią jako jedną z najważniejszych dróg rozwoju techniki nowoczesnych maszyn. Monografia ta jest efektem paroletniego studiowania literatury robotycznej i mechatronicznej, a także

pierwszych prób wprowadzenia aspektów mechatronicznych do dydaktyki budowy maszyn i prac badawczych. Nie bez znaczenia był tu udział autora w międzynarodowych konferencjach poświęconych metodycznym zagadnieniom konstruowania maszyn (ICED'91, '93, '95) oraz miesięczny staż w Loughborough University of Technology (jedno z angielskich centrów kształcenia mechatronicznego), odbyty w 1995 roku w ramach indywidualnego grantu programu TEMPUS.

Czym jest ta monografia?

Jest to wprowadzenie w nowy, interdyscyplinarny obszar nauk technicznych, a nie systematyczne przedstawienie jego podstaw. Wprowadzać w mechatronikę można różnie. Niekoniecznie trzeba zaczynać od jej postaw teoretycznych: mechaniki teoretycznej, teorii obwodów i teorii sterowania. Można zaczynać od okoliczności w jakich mechatronika powstała, od jej praktycznych zastosowań, korzyści z tego wynikających, czy od nietypowych rozwiązań konstrukcyjnych. Ta druga droga jest zwykle ciekawsza, bardziej zachęcająca do poznania. I na tej ciekawości poznawczej, której z reguły nie ma systematyczne przedstawianie podstaw, polega właśnie istota wprowadzenia. Nie oznacza to wcale, że autor nie omawia podstawowej wiedzy mechatronicznej. Oznacza tylko, że celem tej monografii jest: po pierwsze – w miarę przystępne *zapoznanie* czytelnika z pojęciem i istotą mechatroniki, oraz z tym, co można nazwać podejściem mechatronicznym w projektowaniu i konstruowaniu maszyn; po drugie zaś – *zachęcenie* do stosowania tego podejścia. Czy autorowi się to udało, osądzi czytelnik.

Dla kogo przeznaczone jest ta monografia?

Przede wszystkim dla studentów wyższych lat wydziałów mechanicznych; szczególnie tych, którzy specjalizują się w konstrukcji maszyn. Drugą grupą adresatów są nauczyciele akademicy i oczywiście konstruktorzy we wszystkich branżach przemysłu, którzy pragną poznać bliżej istotę działania i projektowania nowoczesnych maszyn.

Co jest w tej monografii i w jaki sposób jest to przedstawiane?

Monografia składa się z siedmiu rozdziałów. W pierwszym próbujemy odpowiedzieć na pytanie: dlaczego mechatronika? W drugim pokażemy istotę podejścia mechatronicznego i wynikającą stąd ogólną strukturę urządzenia mechatronicznego. Kolejne rozdziały poświęcone są właśnie tej strukturze, jej analizie (elementom) i syntezie (projektowaniu i konstruowaniu). I tak rozdział trzeci poświęcony jest sensoryce, czwarty aktoryce, piąty napędowi mechatronicznemu a szósty – największy – projektowaniu mechatronicznemu. Rozdział siódmy jest podsumowaniem całości opracowania.

Zakres i forma przedstawienia treści charakteryzuje się następującymi cechami:

- Jest podporządkowana podstawowym zasadom dydaktycznym przystępności i stopniowania trudności: od znanego do nieznanego, od bliskiego do dalekiego, od konkretnego do abstrakcyjnego. Ponieważ jest to opracowanie skierowane do mechaników, zasady te należy rozumieć jako: od klasycznego rozwiązania mechanicznego do rozwiązania mechatronicznego. Dotyczy to szczególnie drugiego rozdziału, poświęconego istocie podejścia mechatronicznego. Każdy rozdział – oprócz pierwszego, wprowadzającego – zaczyna się krótkim wprowadzeniem a kończy podsumowaniem.
- Podstawowe rozdziały odpowiadają najważniejszym elementom mechatronicznym, bezpośrednio sąsiadującym z klasycznymi elementami maszyn, oraz związanymi z nimi zagadnieniom (sensoryka, aktoryka, napęd mechatroniczny, metodyka projektowania).
- Zagadnienia bezpośrednio związane z techniką mikroprocesorową są potraktowane na tyle szeroko, na ile było to konieczne z punktu widzenia sensoryki i aktoryki.

Monografia ta dotyczy różnych dyscyplin nauk technicznych. Specjalistów z zakresu tych dyscyplin chciałbym prosić o wyrozumiałość, gdy napotkają pojęcia lub uproszczenia odbiegające od kanonów ich dyscypliny. Wytłumaczeniem może być to, że różnorodne materiały, z których korzystałem podczas opracowywania poniższego tekstu, nie były często materiałami źródłowymi, ale interpretacjami mającymi na celu pobudzić przedstawiciela innej dyscypliny do własnego spojrzenia na nowe zagadnienie, co zresztą miało miejsce w moim przypadku. W tym miejscu chciałbym podziękować recenzentom za krytykę i bardzo cenne uwagi. Ich uwzględnienie podniosło niewątpliwie wartość pierwotnej wersji opracowania. Będę bardzo wdzięczny za wszelkie uwagi krytyczne, dotyczące tej monografii.

Marek Gawrysiak

Białystok, w czerwcu 1997

Spis treści

1. Dlaczego mechatronika? 8

- 1.1 Narodziny i dotychczasowy rozwój mechatroniki 8*
- 1.2 Definicje, cel i zakres mechatroniki 10*
- 1.3 Trzy powody integrowania mikroprocesorów z maszynami 14*
- 1.4 Pozatechniczna rola mechatroniki 15*
- 1.5 Podsumowanie 17*

2. Podejście mechatroniczne 18

- 2.1 Ładowarka palet – dwie struktury 18*
- 2.2 Kompensator naprężenia przędzy w nawijarce 22*
- 2.3 Poziomy mechatronizacji 26*
- 2.4 Uniwersalny schemat urządzenia mechatronicznego 27*
- 2.5 Czy zawsze mechatronizacja ma sens? 29*
- 2.6 Podsumowanie 31*

3. Sensoryka 34

- 3.1 System pomiarowy jako system przetwarzania informacji 35*
- 3.2 Rola sensora w systemie mechatronicznym 36*
- 3.3 Mechaniczne wielkości pomiarowe i klasyfikacja urządzeń sensorycznych 40*
- 3.4 Sensory pozycji i ich podstawowa rola w mechatronice 41*
- 3.5 Mikrosensory 49*
- 3.6 Podsumowanie 52*

4. Aktoryka 53

- 4.1 Definicja i istota aktora 53*
- 4.2 Rola aktorów w urządzeniach mechatronicznych 55*
- 4.3 Klasyfikacja i zasady działania aktorów 56*
- 4.4 Mechatroniczny system nastawczy – synteza napędu nastawczego i mikro-*

elektroniki 58

4.5 Aktory elektromagnetyczne 61

4.6 Aktory pneumatyczne 64

4.7 Podsumowanie 66

5. Napęd mechatroniczny 67

5.1 Koncepcja ogólna 67

5.2 Motoreduktor jako aktor 68

5.3 Motoreduktor mechatroniczny jako przegub robota 69

5.4 Sprzęgło mechatroniczne 73

5.5 Elektroniczna synchronizacja ruchów zamiast sztywnego powiązania mechanicznego 74

5.6 Podsumowanie 78

6. Projektowanie mechatroniczne 79

6.1 Charakterystyczne cechy i zagadnienia projektowania mechatronicznego 80

6.2 Stawianie zadań systemom mechatronicznym 86

6.3 Struktura funkcjonalna urządzenia mechatronicznego – płaszczyzna porozumienia specjalistów z różnych dziedzin 92

6.4 Ustalanie struktury funkcjonalnej – modele i metody 99

6.5 Zdobywanie informacji o procesie 113

6.6 Narzędzia projektowania 115

6.7 Przykład tworzenia struktury transformacyjnej systemu mechatronicznego 116

6.8 Podsumowanie 122

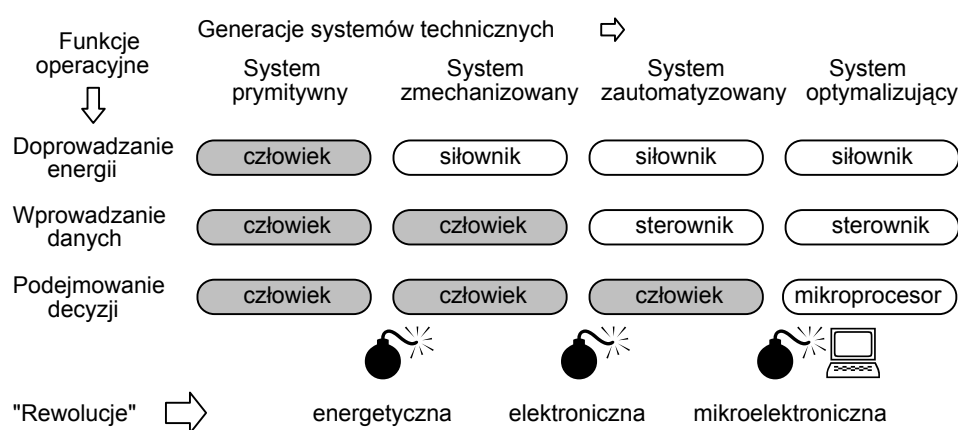
7. Zakończenie 123

8. Literatura 126

1. Dlaczego mechatronika?

1.1 Narodziny i dotychczasowy rozwój mechatroniki

Jesteśmy świadkami kolejnej „rewolucji” przemysłowej. Aby to sobie uświadomić, prześledźmy kolejne etapy rozwoju systemów technicznych z punktu widzenia funkcji operacyjnych, które spełnia w nich człowiek (rys. 1.1). W systemach prymitywnych człowiek, posługując się narzędziem ręcznym, spełnia trzy podstawowe funkcje: (1) dostarcza energii, (2) wprowadza dane sterujące procesem pracy narzędzia i (3) podejmuje decyzje podczas realizacji tego procesu. Kolejne generacje systemów technicznych obywają się bez człowieka jako źródła energii (system zmechanizowany), bez bezpośredniego wprowadzania danych (system zautomatyzowany) oraz podejmowania decyzji procesowych (system optymalizujący). Podstawą pierwszej generacji była „rewolucja” energetyczna, drugiej – elektroniczna. Dziś przeżywamy kolejną „rewolucję”. Jej sprawcą jest *mikroelektronika*, a konkretnie *mikroprocesor* – mały kawałek krzemu z tysiącami tranzystorów, który może być dowolnie programowany w celu sterowania naszym otoczeniem.



Rys. 1.1. Rozwój systemów technicznych jako ubywanie funkcji operacyjnych, wykonywanych przez człowieka-operatora

Wynalezienie mikroprocesora spowodowało nowe spojrzenie na procesy przepływu informacji w maszynach. Jego olbrzymie możliwości obliczeniowe i łatwość programowania, w połączeniu z miniaturowymi rozmiarami i coraz niższą ceną, spowodowały, że zaczęto go wykorzystywać w układach sterowania maszyn. Za-

częły powstawać zintegrowane systemy mechaniczno-elektroniczne. Tak narodziła się mechatronika – interdyscyplinarny obszar nauk technicznych, próbujący zintegrować mechanikę, budowę maszyn, elektrotechnikę, elektronikę i informatykę. Samo słowo – **mechanika** + **elektronika** – pojawiło się pod koniec lat siedemdziesiątych. Wprowadzili je Japończycy do opisu zastosowania elektroniki i techniki komputerowej do sterowania systemami mechanicznymi. Rozprzestrzeniło się ono w ciągu ostatniego dziesięciolecia w Europie i USA i szybko je zaakceptowano. W polskiej literaturze technicznej, jako „mechatronika”, pojawiło się w roku 1987 [TRYLIŃSKI 1987].

Trzy okoliczności miały szczególny wpływ na narodziny i rozwój mechatroniki:

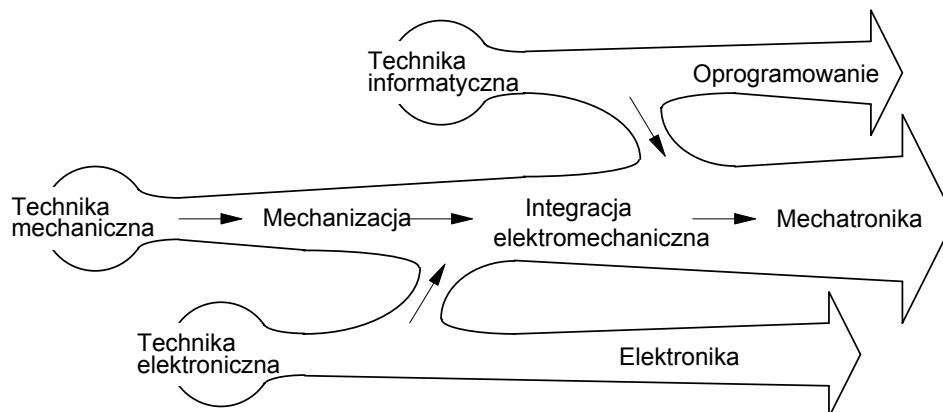
- tanie i masowo produkowane obwody scalone spowodowały, że dotychczasowe środki mechaniczne, realizujące przetwarzanie informacji w maszynach, są zastępowane środkami elektronicznymi;
- pojawienie się mikroprocesora spowodowało, że sterowanie procesami mechanicznymi stało się prostsze, dokładniejsze i bardziej elastyczne („inteligentne”);
- niezawodność zespołów elektronicznych słała się wystarczająco wysoka, aby wytrzymać drgania i inne czynniki środowiska mechanicznego.

Mechatronika systematycznie wykorzystuje nowe konstrukcje półprzewodników przez [GREGORY 1986]:

- zastępowanie konwencjonalnych urządzeń mechanicznych tam, gdzie jest to możliwe (kalkulatory, zegarki);
- zastępowanie mechanicznych nośników funkcji nośnikami elektronicznymi (maszyny do szycia, aparaty fotograficzne, kopiarki, pojazdy);
- dołączanie elektronicznych urządzeń sterowniczych do maszyn konwencjonalnych (obrabiarki sterowane numerycznie, roboty, elektroniczne sterowanie silników).

Postępująca ewolucja mechatroniki – pokazana obrazowo na rys. 1.2 [KAJITANI 1986] – ma ogromny wpływ nie tylko na strukturę nowych maszyn, ale także na sposób ich projektowania i konstruowania. Sterowanie przestaje być fizyczną, organiczną częścią maszyny (można je łatwo od maszyny oddzielić i wymienić na inne), przestaje być sztywny; staje się elastyczny, programowalny. Trudno dziś sobie wyobrazić nowoczesną maszynę bez mikroprocesora. Stał się on jej standardowym elementem, takim jak łożyska, sprzęgła czy przekładnie. Obserwujemy coraz większy podział zadań podczas opracowywania nowych konstrukcji maszyn. Dokumentacja maszyny powstaje już nie tylko w biurze konstrukcyjnym, lecz tak-

że w laboratorium mikroprocesorowym i laboratorium oprogramowania. Coraz ważniejsze staje się wzajemne porozumiewanie się konstruktorów mechaników z elektronikami i informatykami. W literaturze pojawiają się pierwsze pozycje na temat projektowania zintegrowanych układów mechaniczno-elektronicznych [ISERMANN 1993]. Powstają książki o konstruowaniu z zastosowaniem mikroprocesorów, adresowane specjalnie do inżynierów mechaników [STIFFLER 1992]. Tworzy się podstawy metodologii projektowania i konstruowania mechatronicznego [BUUR 1989b, 1990, BRADLEY, BUUR 1993].



Źródło: KAJITANI 1986

Rys. 1.2. Ewolucja mechatroniki z techniki mechanicznej

1.2 Definicje, cel i zakres mechatroniki

W literaturze spotykamy wiele określeń tego, co nazywa się mechatroniką. Powszechnie uznawana definicja mechatroniki nie istnieje. Czy taka definicja jest jednak rzeczywiście potrzebna? Jeżeli tak, to komu? Wydaje się, że rację ma BUUR [1989a], który twierdzi, że definicja jest absolutnie potrzebna do planowania kształcenia inżynierów, badań naukowych i międzynarodowej współpracy badawczej. Dla przemysłu definicja taka ma prawdopodobnie niewielkie znaczenie; technologie bowiem przychodzą i odchodzą a definicja może odzwierciedlać tylko stan bieżący.

Tabela 1.1. Wybrane definicje mechatroniki w porządku chronologicznym

Integracja naturalnie różnych systemów konstrukcyjnych: mechanizmów, obwodów elektrycznych i oprogramowania. Ta konieczność integracji jest jasno widoczna w robotach. [ISHII 1983]
Zastosowanie mikroelektroniki w inżynierii mechanicznej. [Oryginalna definicja Japońskiego Ministerstwa Przemysłu i Handlu (MITI)]
System, w którym rozwinięty (advanced) ruch i rozwinięte sterowanie łączone są systematycznie w celu otrzymania systemu o wysokiej wartości, który może wykonywać rozwinięte funkcje zamierzone. [KAJITANI 1986]
... synergiczna kombinacja precyzyjnej inżynierii mechanicznej, sterowania elektronicznego i myślenia systemowego w projektowaniu produktów i procesów wytwórczych. [IRDAC 1986]
Interdyscyplinarny obszar nauk inżynierskich, który wspiera się na klasycznych dyscyplinach budowy maszyn, elektrotechniki i informatyki. Typowy system mechatroniczny odbiera sygnały, przetwarza je i wydaje sygnały, które z kolei przetwarza np. w siły i ruchy. [SCHWEITZER 1989]
Strategia, która daje odpowiednio zintegrowane połączenie inżynierii mechanicznej, elektroniki i oprogramowania, zastosowana do rozwoju konstrukcyjnego i wytwarzania produktu w celu osiągnięcia optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego. [PRESTON 1989]
Programowalne urządzenia i systemy mechaniczne z sensoryką, aktoryką i komunikacją. [HANSON 1994]
Interdyscyplinarny obszar nauk inżynierskich, który wspiera się na klasycznych dyscyplinach budowy maszyn, elektrotechniki i informatyki. Wzajemne oddziaływania między częściami składowymi określają zachowanie się systemu mechatronicznego. Przy tym należy odróżniać pasywny system mechatroniczny od aktywnego; w systemie pasywnym te oddziaływania wykorzystywane są jednorazowo podczas fazy konstrukcyjnej, aby system idealnie dopasować do określonego przypadku zastosowania; system jest „projektowany mechatronicznie”. Jeżeli te oddziaływania są także wykorzystywane podczas stosowania i użytkowania systemu, a więc wpływają aktywnie również na zachowanie się systemu, to mówi się wtedy o aktywnych systemach mechatronicznych. [FELDERMANN 1995]
Projektowanie systemów, urządzeń i produktów zorientowanych na osiągnięcie optymalnej równowagi między podstawową strukturą mechaniczną i jej całkowitym sterowaniem. [MECHATRONICS 1995]
Synergiczna integracja inżynierii mechanicznej z elektroniką i inteligentnym sterowaniem komputerowym w projektowaniu i wytwarzaniu produktów i procesów. [proponycja Wspólnoty Europejskiej, wg KING 1995]
Projektowanie i wytwarzanie produktów i systemów wykazujących zarówno funkcjonalność mechaniczną jak i zintegrowane sterowanie algorytmiczne. [HEWIT 1995, KING 1995]
Projektowanie maszyn inteligentnych. [HEWIT 1995]
Synergiczna kombinacja inżynierii mechanicznej, inżynierii elektrycznej i techniki informacyjnej dla zintegrowanego projektowania inteligentnych systemów – w szczególności mechanizmów i maszyn. [Międzynarodowa Federacja Teorii Maszyn i Mechanizmów (IFTToMM) 1995]

Szeroki zakres problemów i zastosowań mechatroniki sprawia, że jest ona różnie rozumiana przez przedstawicieli różnych specjalności. Przykładem mogą być definicje zestawione chronologicznie w tabeli 1.1. Trwa dyskusja czy jest to dziedzina

nowa, czy raczej rozszerzenie lub kombinacja kilku dziedzin istniejących [MIU 1993]; nowa filozofia konstruowania czy naturalny etap rozwoju konstrukcji maszyn [GAWRYSIAK 1995(b)]; nowe treści czy tylko stare w nowym opakowaniu, moda czy trwałe zjawisko. Dla jednych mechatronika kojarzy się z „*inteligentnymi mechanizmami*”, dla drugich z *komputerowym sterowaniem maszynami*. Niektórzy utożsamiają ją z *generalną koncepcją robota*, inni widzą w niej *technikę interfejsowania*, a jeszcze inni traktują jako nowy *integrator projektowania* [PRESTON 1989]. Są nawet tacy, którzy widzą mechatronikę jako najnowsze japońskie zagrożenie [HUNT 1988].

Te różne podejścia do mechatroniki mają jednak dwie cechy wspólne – (1) *zastosowanie sterowania komputerowego do operowania różnymi funkcjami mechanicznymi*, za pomocą różnych interfejsów elektrycznych i elektronicznych, oraz (2) *ujęcie systemowe*. To ostatnie objawia się przede wszystkim *synergią* efektów integracji, czyli tym, że finalny produkt mechatroniczny jest czymś więcej niż tylko prostą sumą jego części mechanicznych i elektronicznych.

Mechatronika uczy jak integrować urządzenia mechaniczne ze sterowaniami elektronicznymi (komputerowymi). Zajmuje się badaniem i rozwojem nowych zintegrowanych systemów mechaniczno-elektronicznych, cechujących się pewnym stopniem „*inteligencji*”, przede wszystkim *samodzielnością rozstrzygania*. System mechatroniczny jest w stanie – za pomocą czujników (sensorów) – odbierać ze swego otoczenia sygnały, przetwarzać i interpretować je (za pomocą mikroprocesorów) i na tej podstawie reagować – za pomocą elementów wykonawczych (aktorów) – odpowiednio do sytuacji. Przez to jest elastyczny i może być stosowany w różnorodnych zadaniach. Chodzi więc o programowalne urządzenia i systemy mechaniczne z sensoryką, aktyką i komunikacją [HANSON 1994]. Taka definicja mechatroniki wydaje się być całkowicie niezależna od jej zastosowania.

Jednym z podstawowych celów mechatroniki jest optymalizowanie ruchu urządzeń mechanicznych. Osiąga się to przez *fizyczne integrowanie mikroelektroniki ze strukturami mechanicznymi*. Ważne staje się przy tym *rozdzielanie funkcji*, ponieważ prowadzi to najszybciej do rozwiązań optymalnych [WIKANDER 1994]. Przez rozdzielanie funkcji rozumie się sposób, w jaki całkowita funkcja urządzenia jest rozdzielana na odrębne moduły, które realizują funkcje częściowe, jak każdy z tych modułów jest fizycznie realizowany i gdzie jest umieszczany. Mechatronika oferuje konstruktorom nowy sposób realizacji modułu, czyli nośnika funkcji częściowej: moduł nie musi dalej mieć tradycyjnej postaci mechanicznej, lecz może być rozwiązaniem mechatronicznym – z *sensorami, aktorami i sterowaniem mikroprocesorowym*.

Mechatronika jest często traktowana jako synonim robotyki. Zakresem jednak obejmuje więcej niż [BUUR 1989a]:

- *produkty techniczne*, od głównie elektronicznych (komputery, telefony, urządzenia pomiarowe, kalkulatory kieszonkowe itd.) do głównie mechanicznych (kserokopiarka, maszyna do szycia, aparat fotograficzny, maszyna do pisania itd.);
- *wyposażenie wytwórcze* (obrabiarki sterowane numerycznie, roboty, elastyczne systemy wytwarzania, wyposażenie magazynowe i transportowe);
- *zespoły i elementy* (sensory, silniki elektryczne, wyświetlacze, monitory, złącza elektryczne itd.).

Zakres zastosowania urządzeń mechatronicznych jest bardzo szeroki. Pierwotnym i centralnym zastosowaniem jest robotyka [STADLER 1995]. Inne zastosowania dotyczą obrabiarek, maszyn mobilnych (koparki, maszyny do prac leśnych itp.), robotów, pojazdów, lotnictwa, wyposażenia medycznego, kamer, wyposażenia bankowego itd.. Właściwie to koncepcja mechatroniki jest naturalna i całkowicie niezależna od konkretnego zastosowania. Mechatronika daje się stosować w systemach o bardzo zróżnicowanych rozmiarach: od bardzo małych kamer optomechatronicznych do ogromnych mobilnych maszyn hydraulicznych, takich jak koparki i maszyny do robót ziemnych.

Cechą wspólną urządzeń mechatronicznych jest to, że wzajemny wpływ techniki mechanicznej i elektronicznej przygotowuje drogę dla wcześniej nieznanymi koncepcji konstrukcyjnych. Nie jest to cecha całkowicie nowa. Pojawiła się ona w określeniach takich jak „elektromechanika” czy „mechanika precyzyjna”.

Mechatronika stała się terminem modnym. Za tą modą kryje się jednak świadomość, że nie jest to „tylko” prosta kombinacja bardzo znanych dyscyplin, ale także potrzeba specjalistycznego podejścia do projektowania nowoczesnych urządzeń technicznych.

Jeszcze dziesięć lat temu samochody były przede wszystkim produktami mechanicznymi z elektroniką ograniczoną do zapłonu i radioodbiornika. Inżynierowie w przemyśle motoryzacyjnym użyli pierwszego mikroprocesora po to, by wyjść naprzeciw wymaganiom kryzysu paliwowego i ochrony środowiska (emisji gazów). Dziś elektroniczny system sterowania silnika ciągle mierzy zawartość tlenu w gazach wydechowych w celu ustalenia stosunku powietrza do paliwa. Pozycja wału korbowego, wraz z pomiarami ciśnienia gazów i temperatury czynnika chłodzącego, pozwala mikroprocesorowi obliczyć czas zapłonu. Niektóre drogie samochody mają już 30 i więcej oddzielnych modułów ze sterownikami mikroprocesorowymi. Mikroprocesor steruje aktywnym zawieszeniem, antypoślizgowymi ha-

mulcami, klimatyzacją, dyszą wlotową silnika, napędem na cztery koła, poziomem podłogi, skrzynią biegów itd. Najbardziej spektakularnym przykładem seryjnego produktu mechatronicznego jest system przeciwblokujący dla hamulców pojazdów, tzw. ABS (1967 pierwsza realizacja, 1978 rozpoczęcie produkcji seryjnej, od 1991 norma).

W krajach zachodnich normalnym zjawiskiem są np. chłodziarki, piekarniki, kuchenki mikrofalowe, zmywarki do naczyń, pralki czy maszyny do szycia z wbudowanymi sterownikami mikroprocesorowymi. Wiele z nich to stare urządzenia standardowe o poprawionych cechach i osiąгах, konkurencyjne cenowo. Wagi z odczytem cyfrowym wyparły z rynku wagi mechaniczne z odczytem wskazówkowym (analogowym). Wideokamery nie byłyby ekonomiczne bez mikroprocesorów.

1.3 Trzy powody integrowania mikroprocesorów z maszynami

Główne powody wbudowywania mikroprocesorów w urządzenia mechaniczne można scharakteryzować trzema słowami [KING 1995]: poszerzenie, uproszczenie, innowacyjność.

1.3.1 Poszerzenie charakterystyk

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

1.3.2 Uproszczenie złożonych mechanizmów

System mikroprocesorowy może zastąpić jeden lub kilka skomplikowanych mechanizmów. Przykładem może być modernizacja nacinania gwintów na tokarce. W tokarce tradycyjnej do napędu wrzeciona i śruby pociągowej służy ten sam silnik. Do sterowania stosunkiem prędkości śruby pociągowej i wrzeciona (przedmiotu obrabianego) – jest to warunek wykonywania gwintów o różnym skoku – służą zestawy wymiennych kół zębatach lub przekładnia wielostopniowa o bardzo dużej liczbie przełożeń. Maszyna jest skomplikowana i droga. Rozwiązanie mechatroniczne polega na zastosowaniu oddzielnych silników do napędu śruby pociągowej i wrzeciona tokarki. Przekładnia wielostopniowa staje się zbyteczna. Elektroniczne sterowanie stosunkiem prędkości śruby pociągowej i wrzeciona staje się wygodniejsze, ponieważ „przekładnia” elektroniczna jest bezstopniowa i umożliwia na-

cięcie gwintu o dowolnym skoku. Konstrukcja mechaniczna tokarki zostaje uproszczona. Jej zespoły mogą być używane bardziej elastycznie, co sprzyja oszczędności kosztów. Podobne rozwiązanie jest stosowane w obrabiarkach do kół zębatych w celu zastąpienia sprzężenia (powiązania) mechanicznego między narzędziem (dłutakiem) a kołem obrabianym (otoczką). Zastąpienie skomplikowanej przekładni wielostopniowej przez oddzielnie sterowane napędy bezpośrednie sprawia, że sprzężenie między dłutakiem a otoczką staje się sztywniejsze. Odkształcenia i drgania skrętne wałów, luzy w przekładniach i tolerancje wykonania nie mają wpływu na proces nacinania zębów. Efekt jest podwójny: poprawa jakości kół i uproszczenie konstrukcji maszyny.

1.3.3 Innowacyjność

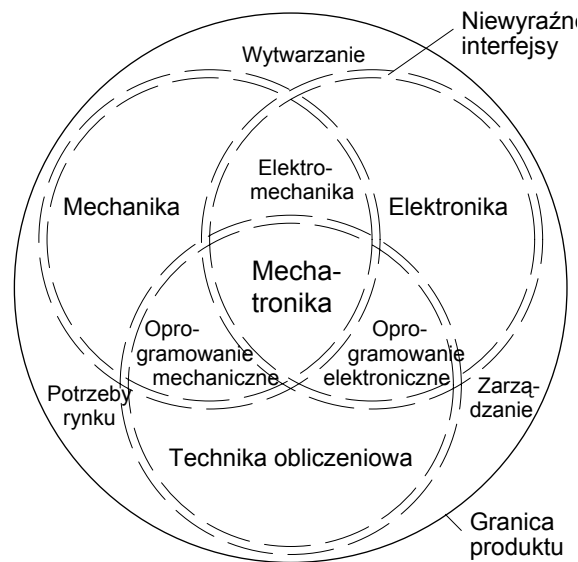
Zastosowanie mikroprocesorów umożliwia stworzenie produktów czy systemów, które dotychczas nie mogły być zrealizowane. Chodzi tu przede wszystkim o roboty i maszyny, które wymagają zaawansowanych technologii sensorycznych, jak np. rozpoznawania obrazu.

Dwa pierwsze powody nie wykluczają się wzajemnie. W wielu przypadkach zastosowanie mikroprocesorów daje podwójną korzyść: poprawia osiągi i obniża koszty.

1.4 Pozatechniczna rola mechatroniki

Ciekawych wyników dostarcza badanie osiągnięć narodów przodujących w handlu. Otóż okazuje się, że jedynym narodem, wykazującym w tym obszarze wzrost w ciągu ostatnich 30 lat, są Japończycy. Panuje opinia, że znaczącą rolę odegrało tu wprowadzenie mechatroniki, szczególnie w drugiej połowie tego okresu. Świadczy o tym analiza mechatronicznych produktów konsumpcyjnych, takich jak kamery wideo czy odtwarzacze płyt kompaktowych.

Z rysunku 1.3 wynika, że podstawowe obszary mechatroniki są ściśle powiązane z potrzebami rynku, wytwarzaniem, zarządzaniem i marketingiem [PRESTON, EDWARDS 1993]. W przypadku Japonii, gdzie większość produktów ma charakter konsumpcyjny, marketing ma znaczenie szczególne. Główne aspekty, rozważane w japońskim myśleniu marketingowym, to: (1) szybka reakcja na wyzwania rynku, (2) skracanie cyklu życia produktu w celu nadążenia za rosnącą potrzebą, oraz (3) nacisk na produkty konkurencyjne. Czynniki te powodują, że cykl rozwoju produktu w Japonii jest krótszy niż w Europie. Przy tym, co ciekawe, stopień innowacji, przypadający na cykl rozwoju, jest często mniejszy.



Źródło: PRESTON, EDWARDS 1993

Rys. 1.3. Jeden z licznych modeli mechatroniki

W Europie cykl rozwoju produktu jest traktowany jako szereg działań systemowych. Działania w takim cyklu dodają się. Jeżeli wprowadzić pewien stopień równoczesności (równoległości) tych działań, to cykl rozwojowy daje się skrócić. Takie podejście jest stosowane w *projektowaniu równoległym* (concurrent design), zwanym także współbieżnym [BRANOWSKI 1995]. Tradycyjnie pozycja marketingu jest również jednym z elementów szeregu innych działań. Jeżeli będzie ona również równoległa (concurrent marketing), to cykl rozwoju produktu da się zredukować jeszcze dalej.

Potrzeba *marketingu równoległego* wiąże się z ogólną definicją mechatroniki. Jest ona widziana jako rozwój produktu przez ściśle zintegrowane zespoły. Aby marketing stał się częścią tej działalności zespołowej, informacja marketingowa powinna być dostępna dla wszystkich członków zespołu rozwijającego produkt. W wielu zakładach informacja ta jest znana tylko „górze”, tym, którzy zapoczątkowują produkt. Często jest ona przypisana do władzy politycznej i ściśle chroniona. Aby można było uprawiać marketing równoległy, informacja ta musi być dostępna generalnie. Powinno to być rozumiane i popierane przez wszystkie poziomy zarządzania.

1.5 Podsumowanie

Mechatronika uczy jak integrować urządzenia mechaniczne ze sterowaniami elektronicznymi (komputerowymi). Zajmuje się badaniem i rozwojem nowych zintegrowanych systemów mechaniczno-elektronicznych, cechujących się pewnym stopniem „*inteligencji*” i *samodzielnością rozstrzygania*. System mechatroniczny jest w stanie – za pomocą czujników (sensorów) – odbierać ze swego otoczenia sygnały, przetwarzać i interpretować je (za pomocą mikroprocesorów) i na tej podstawie reagować – za pomocą elementów wykonawczych (aktorów) – odpowiednio do sytuacji. Przez to jest elastyczny i może być stosowany w różnorodnych zadaniach. Chodzi więc o programowalne urządzenia i systemy mechaniczne z sensoryką, aktyrką i komunikacją [HANSON 1994]. Taka definicja mechatroniki wydaje się być całkowicie niezależna od jej zastosowania.

Główne powody wbudowywania mikroprocesorów w urządzenia mechaniczne to: poszerzenie charakterystyk, uproszczenie konstrukcji mechanicznej oraz innowacyjność, czyli możliwość stworzenia produktów czy systemów, które dotychczas nie mogły być zrealizowane.

Mechatronika staje się *sercem nowoczesnych produktów konsumpcyjnych*. Jako interdyscyplinarny obszar nauk technicznych próbuje zintegrować mechanikę, budowę maszyn, automatykę, elektrotechnikę, elektronikę i informatykę. Symbolem mechatroniki jest mikroprocesor. Bez niego nie ma dziś nowoczesnej maszyny. Staje się on standardowym elementem konstrukcyjnym, takim jak łożyska, sprzęgła, przekładnie zębate itp. Jedną z podstawowych ról inżyniera mechanika staje się opracowywanie i/lub wdrażanie oprogramowania.

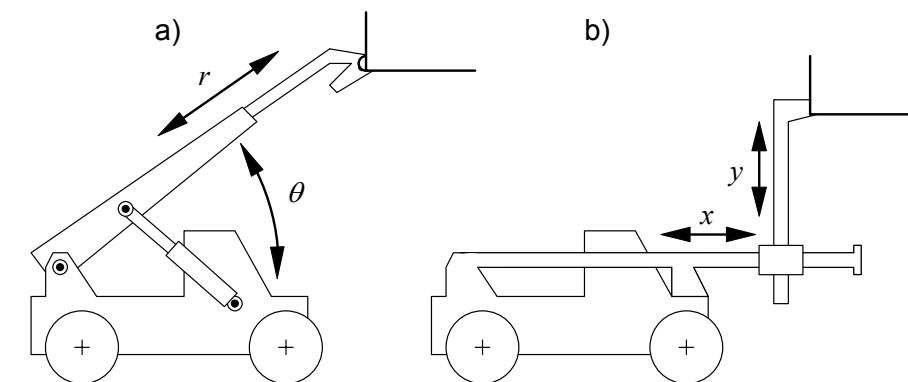
Mechatronika odbierana jest jako synonim *innowacyjności*. Nie daje ona wprawdzie gotowej recepty na nowoczesne, konkurencyjne produkty, ale na pewno istotnie zwiększa prawdopodobieństwo sukcesu. Wyobraźnia nie zna granic. Prawie *każda nowa konstrukcja mechaniczna powinna brać pod rozwagę podsystem mikroprocesorowy jako możliwe rozwiązanie*. Jeżeli produkt ma pozostać konkurencyjny, to stare konstrukcje powinny być dowartościowane mechatroniką. Podstawowe obszary mechatroniki są bowiem ściśle powiązane z potrzebami rynku, wytwarzaniem, zarządzaniem i marketingiem.

2. Podejście mechatroniczne

W rozdziale tym spróbujemy przedstawić istotę podejścia mechatronicznego. Na dwóch przykładach – ładowarki palet i nawijarki nici – pokażemy istotę mechatronizacji. Będą one podstawą do wyprowadzenia ogólnej struktury urządzenia mechatronicznego. Na trzecim przykładzie – „mechatronicznej” pułapki na myszy – spróbujemy pokazać, kiedy stosowanie podejścia mechatronicznego ma sens.

2.1 Ładowarka palet – dwie struktury

Podstawowym celem ładowarki, pokazanej na rys. 2.1a, jest podnoszenie palet i umieszczanie ich zgodnie z potrzebami. Do wykonania takiego zadania konieczne jest sterowanie pozycją widel zamocowanych na końcu wysięgnika teleskopowego, który może obracać się dokoła osi poziomej. Taka konstrukcja mechaniczna – z podstawowymi parametrami r i θ – jest stosowana przede wszystkim z powodu dużego zasięgu przy stosunkowo małych rozmiarach maszyny.



Źródło: HEWIT 1995

Rys. 2.1. Ładowarka z podstawowymi parametrami w układzie biegunowym (a) i kartezjańskim (b)

Konstrukcja taka nie nadaje się jednak zbyt dobrze do układania palet w stopy. Operator zwykle chce wtedy poruszać widłami poziomo (w celu uchwycenia lub uwolnienia widel od palety) lub pionowo (w celu podniesienia lub opuszczenia palety). Ruchy zadania mają więc charakter kartezjański (x, y), w przeciwieństwie do biegunowego (r, θ) charakteru ruchu konstrukcji. Efekt: jeżeli operator chce poruszyć widłami w kierunku x lub y , zgodnie z naturą zadania, to musi operować

dwiema dźwigniami równocześnie. Ale to nie wszystko. Zakres, o jaki te dźwignie muszą być poruszone, zmienia się w przestrzeni zadania. Powoduje to pewne trudności. Jeżeli, na przykład, operator chce przemieścić widły wzdłuż linii pionowej z podłogi do góry, to teleskopowy wysięgnik najpierw kurczy się (r maleje), a później wysuwa się (r rośnie). Ta zmiana kierunku oznacza, w języku teorii sterowania, zmianę znaku wzmocnienia w pętli sprzężenia zwrotnego.

Efekt: operator rzadko jest w stanie prowadzić widły dokładnie pionowo lub poziomo. Zbudowany stos palet często jest krzywy (odchylony od pionu), naraża operatora i innych pracowników.

Oczywiście można skonstruować ładowarkę w układzie kartezjańskim (x, y) (rys. 2.1b). Będzie ona jednak mieć mniejszy zasięg przy zwiększonych gabarytach.

Podejście mechatroniczne pozwala zbudować pojazd (podobny do robota) widziany jako zintegrowany system o 2 stopniach swobody. Zależność między ruchami konstrukcji (przestrzenią konstrukcji) i ruchami zadania (przestrzenią zadania) może być przedstawiona w następujący sposób [HEWIT 1995]:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} x(r, \theta) \\ y(r, \theta) \end{Bmatrix}. \quad (2.1)$$

Po zróżniczkowaniu powyższego mamy

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}. \quad (2.2)$$

Możemy to zapisać jako

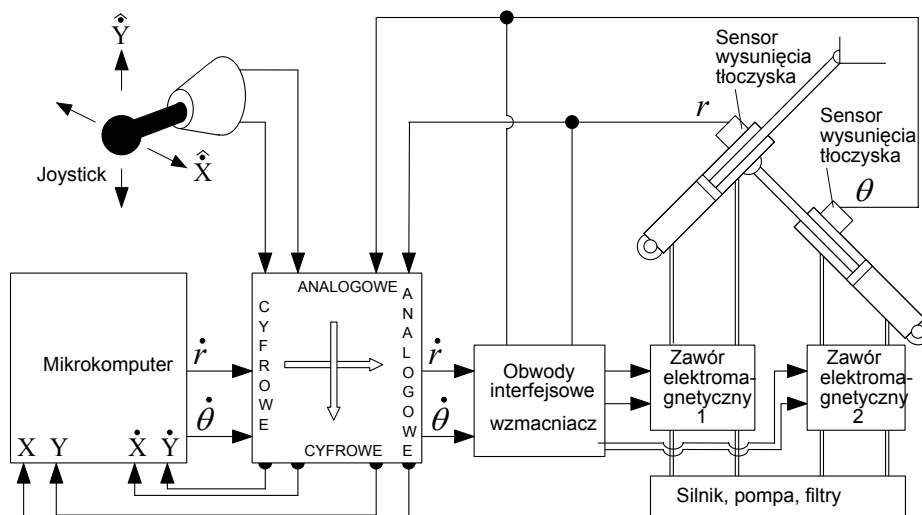
$$\mathbf{z} = \mathbf{J}(\Phi) \cdot \Phi, \quad (2.3)$$

gdzie $\mathbf{J}(\Phi)$ jest tzw. jacobianem. Odwracając (3) otrzymujemy

$$\Phi = \mathbf{J}^{-1}(\Phi) \cdot \mathbf{z}, \quad (2.4)$$

co pozwala w dowolnej chwili obliczyć wymagane prędkości przegubów tak, aby widły poruszały się z wymaganą prędkością w przestrzeni zadania. Równanie jest, przynajmniej w tym przypadku, bardzo proste i łatwe do wykonania przez mikro-

procesor. Takie mechatroniczne sterowanie ruchem siłowników ładowarki pokazuje rys. 2.2.

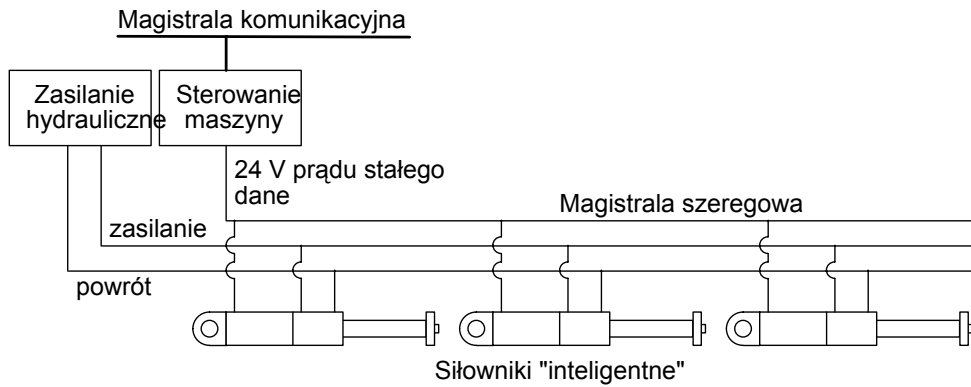


Źródło: HEWIT 1995

Rys. 2.2. Mechatroniczne sterowanie ruchem siłowników ładowarki

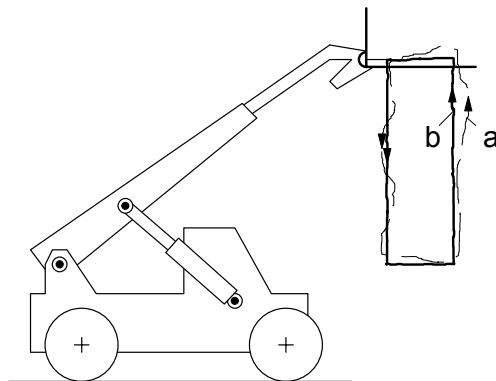
Przykład ten pokazuje korzyści podejścia mechatronicznego. Nie ilustruje jednak poprawnej konstrukcji zintegrowanej, ponieważ przetworniki (sensory) do pomiaru r i θ zostały dodane później do klasycznych zaworów elektromagnetycznych. Taki sposób umieszczenia przetworników mierzących ruch tłoczków siłowników czyni cały układ mniej zwartym i bardziej podatnym na przypadkowe uszkodzenia, co jest niewątpliwie wadą.

Poprawna konstrukcja mechatroniczna w tym przypadku powinna od samego początku zawierać pewien rodzaj siłownika „inteligentnego” (smart actuator). W takim siłowniku przetworniki (sensory pozycji i prędkości tłoczyska), zawory elektromagnetyczne (serwozawory) i obwody interfejsowe umieszczone są w obudowie siłownika. Taka filozofia konstruowania pozwala traktować siłownik hydrauliczny podobnie jak urządzenia elektroniczne; jako coś, co może być prosto przyłączone do standardowej magistrali (standard bus). Jedyna różnica polega na tym, że wymaga on zarówno przyłączenia siłowego zasilania hydraulicznego jak i elektrycznego (rys. 2.3).



Źródło: HEWIT 1995

Rys. 2.3. Zasada sterowania scentralizowanego



Źródło: HEWIT 1995

Rys. 2.4. Efekt rozwiązania mechatronicznego (b) w porównaniu z klasycznym (a)

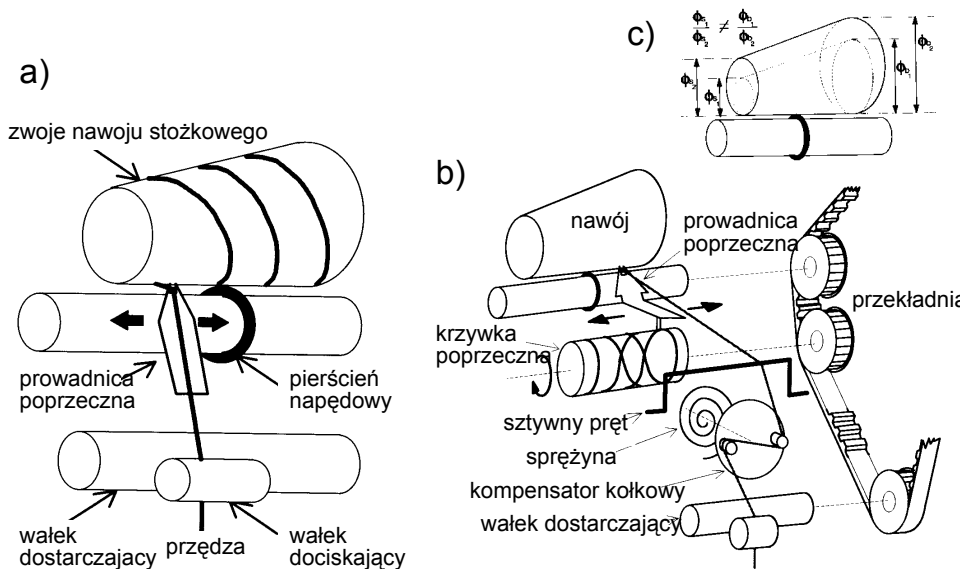
Skutek rozwiązania mechatronicznego jest dobitnie zilustrowany na rys. 2.4. Rysunek ten pokazuje poprawę skuteczności operatora w prowadzeniu widel po ścieżce prostokątnej. Ponieważ maszyna jawi się operatorowi jakby miała konstrukcję kartezjańską (x, y), jest bezpieczniejsza i łatwiejsza do nauki. Operator może operować jedną dźwignią (jedną ręką), pozostawiając drugą ręką do operowania innymi sterowaniami.

2.2 Kompensator naprężenia przędzy w nawijarce

Przykład ten pokazuje jak wbudowanie sterowania mikroprocesorowego uprościło to, co w innym przypadku byłoby bardzo skomplikowanym systemem mechanicznym [KING 1995].

W przemyśle włókienniczym przędza jest często dostarczana do maszyn w postaci samych nawojów, bez nawinięcia jej na cewki czy szpulki. Jest bowiem wygodniej wyciągać przędzę ze środka nawoju (mała bezwładność, ponieważ tylko znikoma część całego nawoju bierze udział w ruchu) niż odwijać ze szpulki (duża bezwładność, ponieważ cała przędza na szpulce i sama szpulka biorą udział w ruchu). Jest to typowy przypadek w maszynach dziewiarskich. Aby przędza odwijająca się płynnie, powinna być nawijana na stożkowe nawoje podczas jej produkcji. To, co jest wygodą dla użytkownika przędzy, stwarza jednak trudności dla jej producenta. W końcowym procesie wytwarzania przędzy nawija się ją na stożek przy stałym stosunku średnic zwojów (jak to ma miejsce w nowoczesnych procesach z wolnym końcem przędzy). Jak widać na rys. 2.5a istnieje cyklicznie zmienne niedopasowanie między zasilaniem i odbiorem przędzy. Przyczyną jest różnica prędkości obwodowych, które występują na dużym i małym końcu stożka. Zmieniające się cyklicznie naprężenie przędzy powoduje złą jakość nawojów i często zrywanie przędzy. Przy małych prędkościach przędzy problem może być rozwiązany przez zastosowanie prostego kompensatora sprężynowego, używającego miękkiej sprężyny do utrzymania odpowiednio stałego naprężenia przędzy czy nici (podobnie jak naprężacz nici w maszynie do szycia). System taki pokazany jest na rys. 2.5b. Dwa kołki, wokół których przechodzi przędza, przymocowane są do talerzyka oscylującego wokół swej osi. Gasi on wahania naprężenia gdy przędza nawijana jest od małego do dużego końca stożka. Przy małych prędkościach nawijania to bierne urządzenie kompensacyjne pracuje bez zarzutu, przy dużych – zawodzi. Doprowadziło to do rozwoju nowych mechanizmów kompensacji naprężenia.

Na pierwszy rzut oka wydaje się to być łatwe. Można sobie wyobrazić, wychodząc z prostej geometrii stożka, że wymagany ruch kompensatora będzie łatwo zrealizować wyłącznie środkami mechanicznymi. W praktyce nie ma do tego środków. Po pierwsze, kąt wzniosu linii śrubowej, wzdłuż której przędza jest nawijana, zmienia się w skomplikowany sposób, częściowo wskutek praktycznych ograniczeń wytwarzania krzywki poprzecznej, rozdzielającej przędzę wzdłuż stożka. Po drugie, wymagana kompensacja zmienia się z biegiem operacji nawijania i ze wzrostem rozmiarów cewki (rys. 2.6c). Te problemy nie wykluczają rozwiązań czysto mechanicznych. Są one jednak zbyt złożone i kosztowne oraz z reguły zawierają powierzchnie ślizgowe (np. krzywki), które muszą być dokładnie uszczelnione przed dostępem włókien i kurzu jaki jest w przędzalni.

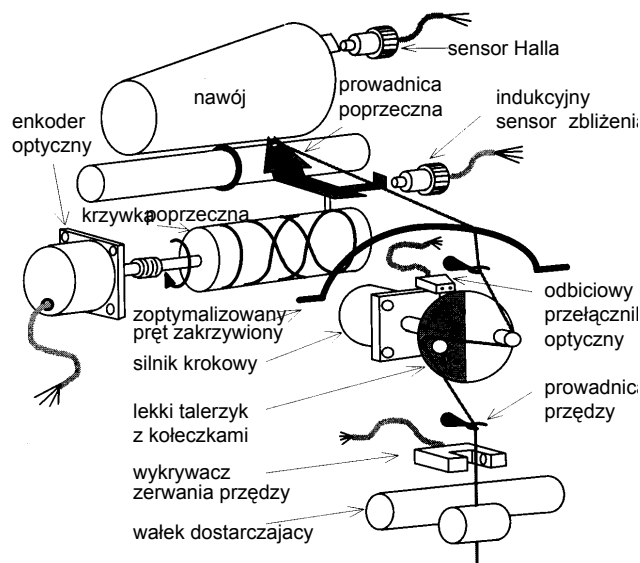


Źródło: KING 1995

Rys. 2.5. Nawijanie nawoju stożkowego: a – ze stałą prędkością dostarczania przędzy, b – z pasywnym kompensatorem mechanicznym, c – zmienny stosunek średnic podczas nawijania

Mechanika mechatronicznego kompensatora naprężenia może być znacznie prostsza. Rysunek 2.6 pokazuje takie urządzenie [KING, YANG 1995]. Prosta dwukołkowa zasada biernego kompensatora sprężynowego pozostała, ale ruch talerzyka jest wymuszany przez mały silnik krokowy, sterowany mikroprocesorem. Strategia sterowania w obwodzie otwartym jest podyktowana niedostępnością jakiegokolwiek taniej i niezawodnej metody pomiaru naprężenia biegnącej przędzy. System sterowania jest pokazany na rys. 2.7. Ruch tarczy jest zsynchronizowany z oscylacjami poprzecznej prowadnicy przędzy za pomocą czujnika optycznego (enkodera), zamocowanego na czopie krzywki poprzecznej. Impulsy wyjściowe z enkodera są zliczane a talerzyk z kołeczkami obraca się o małe przyrosty (jedna czterechsetna obrotu) zawsze wtedy, gdy odpowiednia liczba impulsów zostanie zliczona. Liczby impulsów, które muszą być znane zanim nastąpi kolejny krok silnika, gromadzone są w tablicy danych w pamięci sterownika mikroprocesorowego. W efekcie spełnia to funkcje „krzywki” elektronicznej. „Krzywka” elektroniczna, inaczej niż krzywka mechaniczna, może być jednak funkcją tylu zmiennych, ilu sobie życzymy. Proste (płaskie) krzywki mechaniczne są bowiem funkcją tylko jednej zmiennej, a przestrzenne dwu zmiennych. W tym przypadku efekt wzrostu rozmiarów stożka jest uwzględniany przez sporządzenie dwuwymiarowej

tablicy danych w taki sposób, aby zawierała ona dane dla liczby kolejnych przyrostów średnicy stożka. Dodanie trzeciego wymiaru umożliwia rezygnację ze skomplikowanych mechanizmów, stosowanych zwykle w systemach nawijania w celu uniknięcia sztywnego ukształtowania nawoju, gdy kolejne warstwy nachodzą na siebie zbyt ściśle. Za pomocą układów czysto mechanicznych jest to prawie niemożliwe do osiągnięcia.

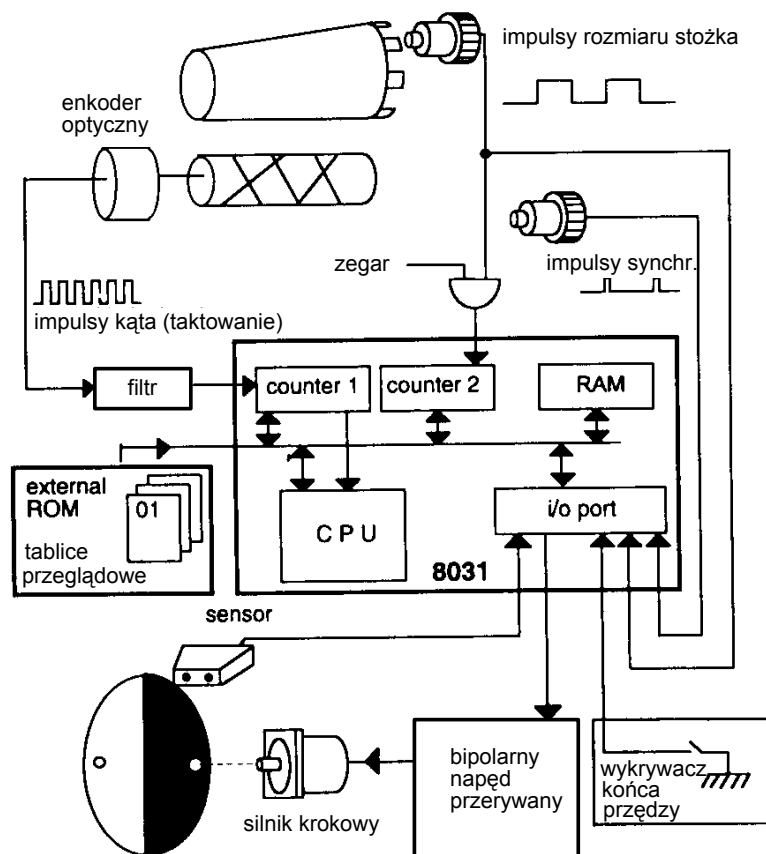


Źródło: KING 1995

Rys. 2.6. Mechatroniczny kompensator naprężenia przędzy

Oprócz uproszczenia systemu rozwiązanie mechatroniczne ma inne ważne zalety w porównaniu z czynną kompensacją mechaniczną. Niektóre z nich wyrażone są typowymi charakterystykami rozwiązań mechatronicznych. Jest ono bardzo elastyczne – zmiana kąta stożka (zmienne kąty są używane w przemyśle włókienniczym) może być dokonana łatwo przez wymianę informacji w tablicy danych. Podobnie inne zmiany konfiguracji maszyny są proste, np. zmiany ścieżki przędzy. W rozwiązaniu czysto mechanicznym zwykła zmiana pozycji prowadnicy przędzy wymaga przekonstruowania całego kompensatora! System mechatroniczny wykazuje także znaczące korzyści z innego punktu widzenia. Współpracuje on łatwo z człowiekiem-operatorem lub systemami automatycznymi w przędzarce. Na przykład może on „parkować” talerzyk z kołeczkami w pozycji wygodnej do przewlekania (nawlekania) przędzy. Jest to bardzo ważne, ponieważ w najnowocześniejszym

szych maszynach zadanie to jest wykonywane za pomocą szczypiec robotycznych. I znowu jest to trudno osiągnąć za pomocą rozwiązania czysto mechanicznego.



Źródło: KING 1995

Rys. 2.7. Schemat układu sterowania nawijaniem przędzy

2.3 Poziomy mechatronizacji

Jak ocenić poziom mechatronizacji urządzenia? Czy na podstawie poziomu zainstalowanej elektroniki? Na podstawie stopnia prostoty konstrukcji mechanizmów? Na podstawie stopnia integracji mechaniki z elektroniką? O poziomie mechatronizacji urządzenia można także sądzić na podstawie tego, w jakim stopniu obniżają się jego możliwości, gdy całkowicie przestanie funkcjonować elektronika. Z takiego punktu widzenia stopień mechatronizacji np. współczesnych samochodów nie jest wysoki. Mają one przede wszystkim elektroniczne sterowanie zapłonem lub wtryskiem paliwa w silnikach oraz elektroniczne przeciwdziałanie blokadzie kół podczas hamowania. Dotychczasowy przebieg mechatronizacji samochodów można określić jako naturalny, polegający na dodawaniu elementów elektronicznych do elementów mechanicznych. Jest to głównie poszerzenie i poprawienie charakterystyk, mniej zaś uproszczenie konstrukcji mechanicznej. To samo dotyczy maszyn włókienniczych, w których systemy do tworzenia wzorów zostały wdrożone we wczesnych latach siedemdziesiątych za pomocą systemów minikomputerowych. Ponieważ procesory były wtedy bardzo drogie, znaczne poszerzenie cech produktu było jedynym praktycznym celem ich zastosowania, nawet w skomplikowanych, bardzo drogich maszynach. Systemy mikrokomputerowe pojawiły się dopiero pod koniec lat 1970-tych. Z inżynierskiego punktu widzenia bardziej interesujące stały się inne punkty widzenia w zastosowaniu techniki mikroprocesorowej: uproszczenie i innowacyjność rozwiązań konstrukcyjnych.

Inaczej było w przypadku robotów [ISII i inni 1988]. Tu od samego początku zakładano wykorzystanie komputerów. Robot bez systemu informacyjnego jest tylko prostym, wielocłonowym mechanizmem przegubowym. Mechatronizacja robotów okazuje się być na istotnie innym poziomie. Zakres właściwych im problemów mechatroniki jest coraz większy i przejawia się dostatecznie jasno. Dlatego robot jest uznawany powszechnie za najbardziej uniwersalne urządzenie mechatroniczne. Składa się ono z trzech niezbędnych, podstawowych elementów:

- *Elementów wykonawczych (aktorów)*, za których pomocą robot aktywnie oddziałuje na otoczenie, czyli bezpośrednio ingeruje (nastawia) w sterowany proces techniczny; są to głównie elementy mechaniczne.
- *Czujników (sensorów)*, za których pomocą robot zdobywa niezbędne informacje o procesie; elementy te w swojej pracy wykorzystują technikę pomiarów.
- *Przetworników informacji (procesorów)*, za których pomocą robot odpowiednio przetwarza (oblicza, kieruje, przełącza) informacje; są to elementy techniki komputerowej.

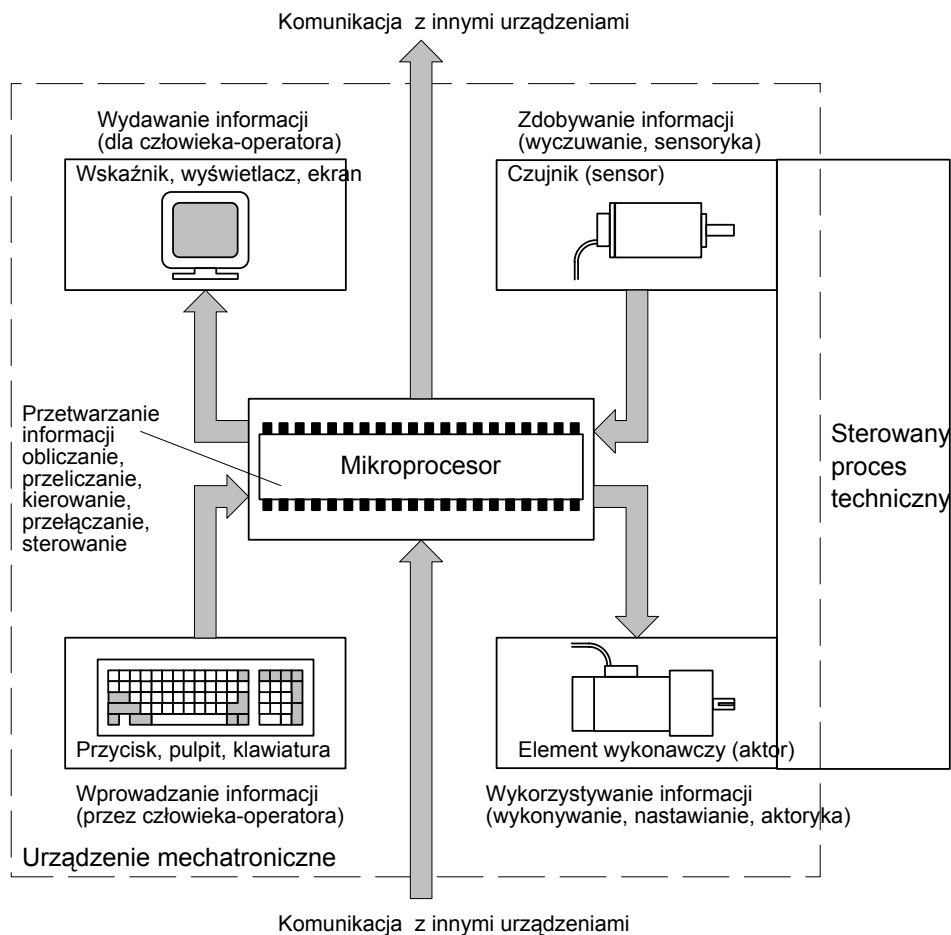
Na przykładzie robota i rozwoju robotyki widać także istotną różnicę między prostym podejściem elektromechanicznym i podejściem mechatronicznym. Pierwotnie na robot patrzoneo jako na zbiór oddzielnych przegubów. Każdy z tych przegubów miał swój przetwornik pomiarowy (sensor) i swój element wykonawczy (aktor) i był sterowany oddzielnie. Cały układ był rozważany jako zbiór N podukładów o jednym stopniu swobody. Wynikiem takiego rozumowania było trudne programowanie robota. Ruchy pierwszych robotów były szarpane i niezgrabne. Przełom nastąpił wtedy, gdy wprowadzono koncepcję wielu zmiennych. Każdy przegub zaczął być sterowany w taki sposób, że uwzględniał dokładnie położenie innych. Cały układ zaczął być rozważany jako jeden układ o N stopniach swobody. Ta zmiana punktu widzenia była może jednym z ważniejszych powodów, dla których roboty przemysłowe znalazły tak szerokie zastosowanie. Jeden układ o N stopniach swobody zamiast N układów o jednym stopniu można traktować jako milowy krok w rozwoju robotyki i zarazem początek mechatroniki [HEWIT 1995].

2.4 Uniwersalny schemat urządzenia mechatronicznego

Jeżeli do aktorów, sensorów i procesorów dodamy elementy, za których pomocą człowiek-operator wprowadza/otrzymuje informacje do/z tego systemu, to otrzymamy uniwersalny schemat urządzenia mechatronicznego (rys. 2.8). Jest on słuszny zawsze wtedy, gdy człowiek-operator już nie nadzoruje procesu technicznego sam swoimi zmysłami (sensoryką) i nie wpływa na ten proces swoimi czynnościami ruchowymi (motoryką), lecz stosuje do tego celu sterowanie (sterownik mikroprocesorowy), któremu wydaje własne rozkazy i z którego otrzymuje meldunki zwrotne. Bezpośrednie włączanie się człowieka w proces zastąpione jest dialogiem między człowiekiem i sterowaniem (mikroprocesorem). Aby taki dialog umożliwić, urządzenie ma elementy do wprowadzania informacji (przyciski, klawisze, pokrętła czy dźwignie do wprowadzania ręcznego lub mikrofony do wprowadzania głosowego), oraz do wydawania informacji (wskaźniki, wyświetlacze, ekrany, głośniki). Czujniki (sensory) dostarczają sterowaniu informacji o wielkościach fizycznych w procesie. Informacje ze sterowania, po odpowiednim przetworzeniu, są dostarczane do urządzeń wykonawczych (aktorów), aby w pożądanym sposób zmieniać te wielkości.

Cechą charakterystyczną urządzenia mechatronicznego jest *rozbudowane przekazywanie informacji* do, z, lub wewnątrz systemu. Nadaje dodatkową wartość układowi mechanicznemu i jest, być może, najbardziej znaczącym dokonaniem ostatnich czasów. Stanowi podstawę do symulowania inteligencji, czemu towarzyszy rozszerzenie „mądrości” systemu.

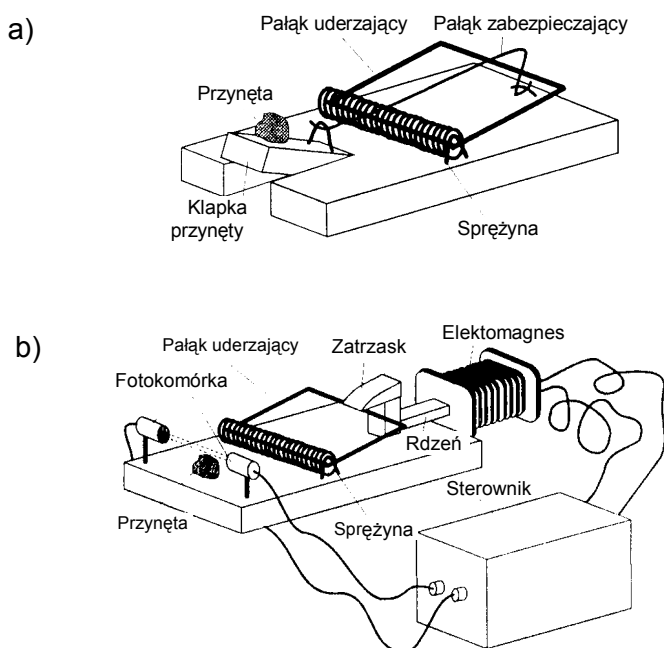
Kręgosłupem urządzeń mechatronicznych jest *obwód sterowania*. Może on być lub nie być zamknięty ponad systemem komunikacyjnym, który reprezentuje istotną część nowoczesnych systemów mechatronicznych. Obserwuje się trend do decentralizacji i fizycznego umieszczania elementów składowych sterowania (np. zasilania) bliżej procesu fizycznego i elementów mechanicznych. Efektem jest redukcja okablowania, lepsza jakość sygnału, ułatwienie budowy modułowej itp.



Rys. 2.8. Uniwersalny schemat urządzenia mechatronicznego

2.5 Czy zawsze mechatronizacja ma sens?

Nie zawsze zastosowanie mechatroniki ma sens. Bardzo dobrze to można pokazać na może nieco satyrycznym przykładzie pułapki na myszy [RODDECK 1997]. To wszystkim znane proste urządzenie (rys. 2.9a) ma wiele cech mechatronicznych. Ma ruchomą kłapkę przynętę (sensor), która wyczuwa ciężar myszy. W sprężynie mamy zmagazynowaną energię do napędu pałaka uderzającego (aktor). Sensor i aktor są wzajemnie powiązane za pomocą pałaka zabezpieczającego (sterowanie mechaniczne), który zwalnia aktor wtedy, gdy siła na sensorze przekroczy określoną wartość. Za pomocą tego prostego systemu mechanicznego od stuleci myszy są „łapane”, a właściwie uśmiercane.



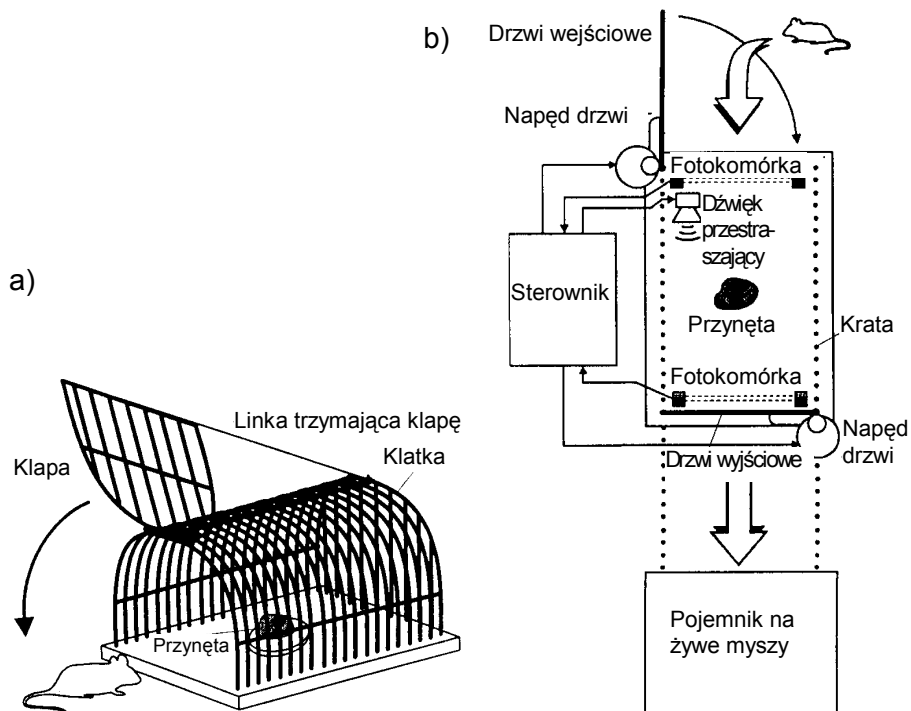
Źródło: RODDECK 1997

Rys. 2.9. Klasyczna (a) i „mechatroniczna” (b) pułapka na myszy

Spróbujmy ten zadziwiający w swej prostocie system mechaniczny „uzbroić” w mechatronikę (rys. 2.9b). Zastąpmy sensor mechaniczny fotokomórką i zaryglujmy pałak zabezpieczający za pomocą zatrzasku elektromagnetycznego. Foto-

komórkę i zatrzask powiązmy wzajemnie za pomocą sterownika elektronicznego, który przy przerwaniu strumienia świetlnego przez mysz odrygluje zatrzask, aby pałak uderzający mógł zrealizować swe zadanie. Funkcja użyteczna takiej pułapki mechatronicznej jest więc dokładnie taka sama jak mechanicznej; z jedną różnicą – pułapka mechatroniczna będzie co najmniej kilkadziesiąt razy droższa od mechanicznej.

Czy, wobec tego, mechatronizowanie pułapki na myszy jest pozbawionym sensu? Nie. Mechatronizacja zaczyna nabierać sensu wtedy, gdy od pułapki zaczniemy wymagać funkcji bardziej użytecznej, a mianowicie złapania myszy żywej. Jednak i tu istnieje także rozwiązanie czysto mechaniczne, choć bardziej złożone (rys. 2.10a). Mysz jest łapana w klatkę po naciśnięciu swym ciężarem na klapkę uruchamiającą klapę wejściową. Wszystkie elementy funkcjonują znowu prosto i mechanicznie. Także w tym przypadku „dozbrojenie” mechatroniczne (fotokomórka, zatrzask elektromagnetyczny) nie przynosi nic nowego oprócz wzrostu kosztów wytwarzania pułapki.



Źródło: RODDECK 1997

Rys. 2.10. Mechaniczna (a) i mechatroniczna (b) pułapka do łapania myszy żywych

Dopiero gdy zaczniemy wymagać, aby urządzenie mogło łapać kolejne myszy, bez ingerencji człowieka, system czysto mechaniczny okaże się zawodny lub będzie bardzo złożony. I tu z pomocą przychodzi mechatronika (rys. 2.10b). Przednią i tylną stronę pułapki możemy wyposażać w drzwi z napędem elektrycznym. Na początku przednie drzwi są otwarte a tylne zamknięte. Jeżeli mysz zostanie skuszona przynętą i wejdzie do środka, to uruchomi fotokomórkę, której sygnał z kolei uruchomi napęd drzwi i je zamknie. Równocześnie otworzą się drzwi tylne, prowadzące do pojemnika na żywe myszy. Elektrycznie uruchamiany głośnik, z którego płynie dźwięk przestraszający, spowoduje, że mysz opuści klatkę przez drzwi tylne i znajdzie się w pojemniku. Wtedy znowu drzwi tylne, sterowane przez fotokomórkę, zamkną się, a przednie zostaną otwarte. Pułapka znajdzie się w stanie początkowym i może łapać i „magazynować” kolejne żywe myszy.

W ten sposób powstał system mechatroniczny, który jest prawie niemożliwy do zastąpienia przez proste rozwiązanie mechaniczne, ponieważ realizuje on dodatkowo wymagane funkcje.

2.6 Podsumowanie

Urządzenie mechatroniczne jest złożonym systemem zintegrowanym, zawierającym kilka podsystemów o zróżnicowanej naturze fizycznej. Oprócz działania *mechanicznego* (aktywność) jest on w stanie *wyczuwać* swoją pozycję (sensoryka), *porównywać* ją z pozycją zadaną (pożądaną), a następnie – w zależności od różnicy tych pozycji – *oceniać* sytuację i *podejmować decyzję* dotyczącą działania mechanicznego. Po podjęciu decyzji urządzenie *wykonuje* zadanie końcowe (zwykle jest to praca mechaniczna), które jest następnie *sprawdzane* przez sensorykę.

Konstruktorzy-mechanicy nie mogą dalej ograniczać swojej działalności do czysto mechanicznych aspektów projektowania i konstruowania maszyn i urządzeń. Nie oznacza to wcale, że aspekty mechaniczne przestają być ważne. Podczas projektowania i konstruowania coraz bardziej ważne staje się jednak to, co poszczególne zespoły urządzenia *mogą robić*, niż to z czego się składają. To, co łatwo daje się zrobić mechanicznie, robimy sposobem mechanicznym, to zaś, co łatwo daje się zrobić elektronicznie, robimy sposobem elektronicznym i łączymy (integrujemy) obie części – mechaniczną i elektroniczną. Tak można by ująć istotę podejścia mechatronicznego i istotę różnicy między systemami konwencjonalnymi i mechatronicznymi (tab. 2.1 i 2.2).

Prawie każda nowa konstrukcja mechaniczna powinna brać pod rozwagę podsystem mikroprocesorowy jako możliwe rozwiązanie. Jeżeli produkt ma pozostać konkurencyjny, to stare konstrukcje powinny być dowartościowane mechatroniką.

Tabela 2.1. Cechy systemów projektowanych konwencjonalnie i mechatronicznie

Projektowanie konwencjonalne	Projektowanie mechatroniczne
<i>Dodawanie części składowych</i>	<i>Integracja części składowych</i>
1. Obszerność (zajmowanie dużo miejsca)	Zwartość (kompaktość)
2. Złożone mechanizmy	Proste mechanizmy
3. Problemy z kablami	Magistrale (busy) lub komunikacja bezprzewodowa
4. Połączone części składowe	Jednostki autonomiczne
<i>Proste sterowanie</i>	<i>Integracja przez przetwarzanie informacji</i>
5. Sztywna konstrukcja	Elastyczna konstrukcja z tłumieniem elektronicznym
6. Sterowanie według prognozy, liniowe, analogowe	Sterowanie według sprzężenia zwrotnego, nieliniowe, cyfrowe
7. Precyzja przez małe tolerancje	Precyzja przez pomiary i sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym
8. Wielkości niemierzalne zmieniają się dowolnie	Sterowanie oszacowanymi wielkościami niemierzalnymi
9. Proste monitorowanie	Nadzór z diagnostyką uszkodzeń
10. Zdolności ustalone, niezmiennie	Zdolność uczenia się

Źródło: ISERMANN 1996

Tabela 2.2. Przykłady realizacji systemów mechatronicznych w samochodach (dla cech podanych w tabeli 2.1)

Projektowanie konwencjonalne	Projektowanie mechatroniczne
<i>Dodawanie części składowych</i>	<i>Integracja części składowych</i>
1. Mechaniczny podwójny gaźnik	Wtrysk elektroniczny
2. Mechanicznie sterowana pompa wtryskowa z obracającym się tłokiem	Pompa wysokociśnieniowa i magnetyczne zawory wtryskowe
3. Wiele kabli	Magistrala kablowa
4. Napęd pasowy urządzeń pomocniczych	Zdecentralizowany napęd urządzeń pomocniczych
<i>Proste sterowanie</i>	<i>Integracja przez przetwarzanie informacji</i>
5. Sztynny łańcuch napędowy	Elektroniczne, nieliniowe sterowanie przepustnicą
6. Mechaniczny pedał gazu	Elastyczny łańcuch napędowy z algorytmicznym tłumieniem przez sterowanie silnika
7. Aktory sterowane przez uprzedzanie zjawisk (feedforward)	Aktory sterowane sprzężeniem zwrotnym z kompensacją tarcia
8. Ręczne (nożne) sterowanie samochodem podczas poślizgu kół	Sprzężeniowozwrotne sterowanie kątem poślizgu kół przez obserwator stanu poślizgu i zróżnicowane hamowanie
9. Monitorowanie gazów wydechowych podczas przeglądu w warsztacie	Natychmiastowe wykrywanie złego spalania przez pomiar szybkości wału korbowego
10. Stałe programy dla automatycznej skrzyni biegów	Adaptacja automatycznej skrzyni biegów do konkretnego kierowcy

Źródło: ISERMANN 1996

3. Sensoryka

Czujniki, wykorzystywane w maszynach, odpowiadają zmysłom człowieka. Są instrumentami, które dostarczają informacji o stanie samej maszyny i jej otoczenia. Na podstawie tej informacji mikroprocesor określa działania maszyny.

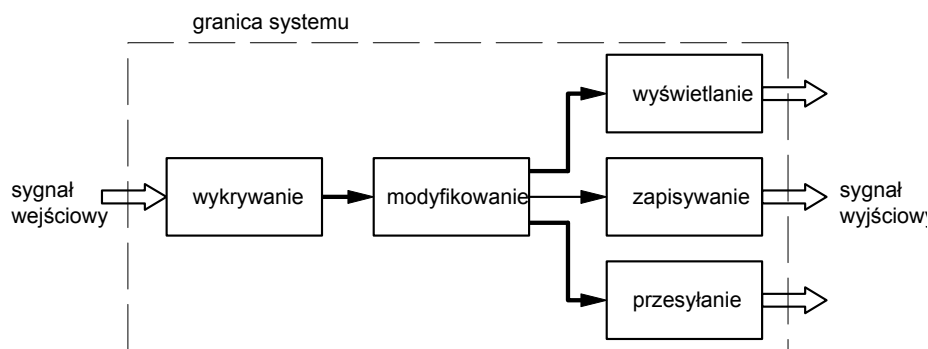
Informacja o położeniu, temperaturze, sile itp., jeżeli tylko daje się przetworzyć na sygnały elektryczne, daje się łatwo obrabiać przez mikroprocesor (komputer). Im więcej czujników, tym więcej informacji można otrzymać o otoczeniu. Ale interesującą nas informację nie zawsze można bezpośrednio ująć za pomocą czujników. Taka sytuacja może mieć miejsce na przykład wtedy, gdy mierzony sygnał jest skażony zakłóceniami, gdy kontrolowana wielkość nie daje się przetworzyć na sygnał elektryczny, a także wtedy, gdy z powodu ograniczeń kosztowych lub przestrzennych nie daje się wykorzystać niezbędnego czujnika. Jeżeli w takich przypadkach wiemy jak obiekt reaguje na zakłócenia, to za pomocą odpowiednich obliczeń można ocenić interesujący nas sygnał. Na przykład prędkość kątową ramienia robota można ocenić na podstawie kontrolowanego kąta obrotu przegubu robota.

Czujniki w urządzeniach mechatronicznych mierzą wielkości sterowane, sterujące, zakłócające itp.. Mogą to być pomiary bezpośrednie lub pośrednie. W tym drugim przypadku chodzi o oszacowanie tych wielkości na podstawie innych wielkości, za pomocą tzw. algorytmu obserwatora. W obwodach sterowania ze sprzężeniem zwrotnym czujniki są niezbędne. Istota takich obwodów polega bowiem na obróbkę sygnału, pochodzącego od czujnika, w celu uzyskania informacji potrzebnej do bezpośredniego sterowania układem mechanicznym.

Poniżej przedstawimy najważniejsze zagadnienia sensoryki w urządzeniach mechatronicznych. Zaczniemy od systemu pomiarowego jako systemu przetwarzania informacji i związanych z nim pojęć, takich jak *czujnik*, *przetwornik*, *sensor*, *aktor*, *procesor*. Następnie przedstawimy rolę sensora w systemie mechatronicznym, podstawowe mechaniczne wielkości pomiarowe oraz kryteria klasyfikacji urządzeń sensorycznych. Podstawową rolę odgrywają tu sensory pozycji (drogi) w ruchu obrotowym. Krótko omówimy podstawowe zasady działania tych sensorów, wysyłane przez nie sygnały pomiarowe i ich obróbkę; przedstawimy budowę resolverów i enkoderów, „inteligentnego” kołnierza silnika oraz łożyska tocznego zintegrowanego z czujnikiem. Na koniec zajmiemy się mikrosensorem.

3.1 System pomiarowy jako system przetwarzania informacji

Podstawowe funkcje systemu pomiarowego, jako systemu przetwarzającego informacje, przedstawia rys. 3.1. Sygnałem wejściowym jest wielkość fizyczna, która ma być mierzona (np. przemieszczenie). Wielkość mierzona jest wykrywana lub wyczuwana (stąd polska nazwa „czujnik”) przez obiekt, zwykle nazywany *przetwornikiem wejściowym* lub *sensorem*. Sensor może być zdefiniowany jako czujnik pomiarowy, który odbiera wartości mechaniczne, chemiczne, termiczne lub optyczne i przetwarza je w sygnały elektryczne [SCHNELL 1993], a więc jako przetwornik nieelektrycznej wielkości fizycznej w sygnał elektryczny [GARDNER 1994]. Sygnał elektryczny z sensora wymaga często modyfikacji zanim może spełniać użyteczną funkcję, np. wyświetlić informacje dla operatora, zapisać je na jakimś nośniku informacji, czy przekazać do innego urządzenia.

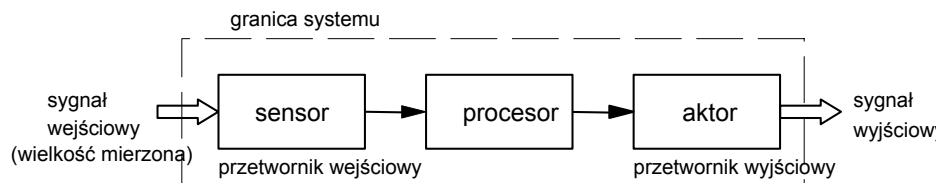


Źródło: GARDNER 1994

Rys. 3.1. Funkcjonalny schemat blokowy systemu pomiarowego

Większość sygnałów, pochodzących z czujników, ma naturę analogową. W takim przypadku konieczne jest analogowe przetwarzanie sygnału. Sygnał elektryczny z sensora przechodzi przez urządzenie modyfikujące – zwane procesorem – bez zmiany formy energii, która opisuje ten sygnał. Często przydatne jest rozróżnianie między główną jednostką przetwarzania (np. mikroprocesor) i jednostką przygotowania sygnału (np. wzmacniacz, filtr czy przetwornik analogowo-cyfrowy). Ten ostatni rodzaj urządzenia nazywany jest *preprocesorem* lub *przetwornikiem*. Zarówno preprocesory jak i procesory odgrywają ważną rolę w systemach pomiarowych.

Na koniec sygnał z procesora jest stosowany do wyświetlania niektórych informacji operatorowi, np. na ekranie. Alternatywnie sygnał może być zapisywany, np. na papierze, dyskietce magnetycznej czy w kostce obwodu scalonego (RAM, EPROM itd.). Każde urządzenie, które przetwarza sygnał elektryczny w nieelektryczną wielkość fizyczną jest nazywane *aktorem* (aktuatorem) lub *przetwornikiem wyjściowym*. Na przykład wyświetlenie informacji na ekranie jest przetworzeniem sygnału elektrycznego w sygnał optyczny i dlatego można je nazywać procesem aktuacji (wprawiania w ruch). Sygnał optyczny może być następnie wykrywany, modyfikowany i aktuowany przez człowieka-operatora.



Źródło: GARDNER 1994

Rys. 3.2. Podstawowe elementy systemu pomiarowego (przetwarzania informacji)

Oczywiście może istnieć wiele poziomów w systemie przetwarzania informacji. Rysunek 3.2. pokazuje jego najbardziej podstawowe składowe: sensor, procesor sygnału (włączając preprocesor) i aktor. Kolejny rozdział poświęcony jest przede wszystkim sensorom, jednak omówienie pozostałych dwóch składowych ma miejsce wtedy, gdy zachodzi tego potrzeba.

3.2 Rola sensora w systemie mechatronicznym

Jak się przekonaliśmy, mam na uwadze poprzedni punkt, sensory tworzą istotną część systemów przetwarzania informacji. Więcej, wyjście z sensora może być również użyte do sterowania procesem mechanicznym.

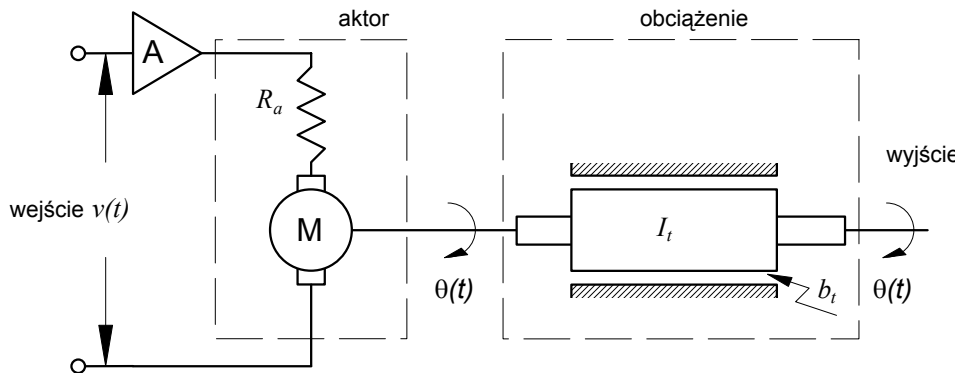
Załóżmy, że z sensora otrzymaliśmy sygnał napięciowy $v(t)$ i chcemy go użyć do sterowania położeniem wału silnika. Rysunek 3.3 pokazuje elementy silnika prądu stałego (tzn. aktora), w którym napięcie wejściowe $v(t)$ jest wzmacniane i używane do napędu twornika silnika wytwarzającego moment obrotowy. Silnik napędza obciążony momentem wał maszyny, który obraca się o kąt $\theta(t)$. Tak więc odpowiedzią systemu jest kąt $\theta(t)$, o jaki porusza się wał maszyny. Rysunek 3.4 pokazuje schematycznie sterowanie w układzie otwartym aktora, razem z opisem procesu

za pomocą standardowego nazewnictwa automatyki. W układzie otwartym sygnał wyjściowy $Y(s)$, w zależności od sygnału wejściowego $V(s)$, ma postać

$$Y(s) = G_p(s)G_m(s)V(s), \quad (3.1)$$

gdzie $G_p(s)$ i $G_m(s)$ są transmitancjami sterownika/wzmacniacza (tzn. procesora) i elementów silnika/wału maszyny, odpowiednio, a $V(s)$ jest transformatą Laplace'a wejściowego sygnału napięciowego $v(t)$. Transformata dla całego systemu

$$G(s) = Y(s)/V(s) = G_p(s)G_m(s). \quad (3.2)$$



Źródło: GARDNER 1994

Rys. 3.3. Liniowy model silnika prądu stałego i jego obciążenia

Dla wyidealizowanego modelu silnika prądu stałego (rys. 3.4) transmitancja może być napisana jako

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{A}{s(1 + \tau s)}, \quad (3.3)$$

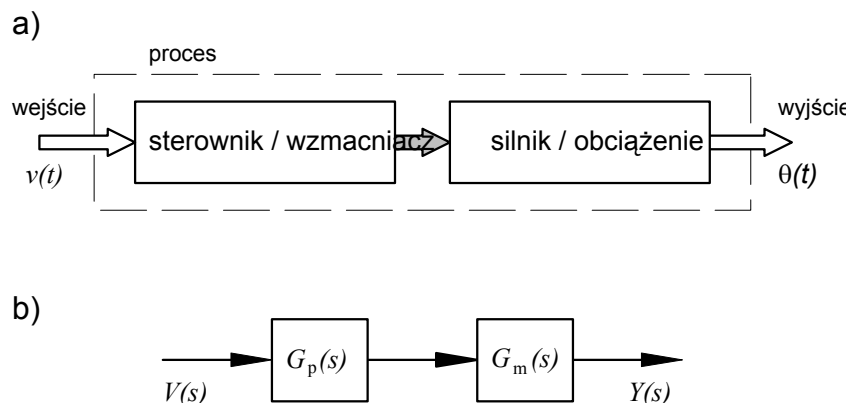
ze wzmocnieniem statycznym

$$A = \frac{k_m}{b_t R_a + R_m k_b}, \quad (3.4)$$

gdzie k_m jest stałą sprężystości mechanicznej, R_a rezystancją twornika, R_m stałą momentu obrotowego, k_b współczynnikiem siły elektromotorycznej, a b_t całkowi-

tym tarcie wiskotycznym. Stała czasowa tego obwodu, zależna od całkowitego momentu bezwładności wirnika silnika I_t i współczynników tarcia, wynosi:

$$\tau = \frac{I_t}{(b_t + k_m k_b / R_a)}. \quad (3.5)$$

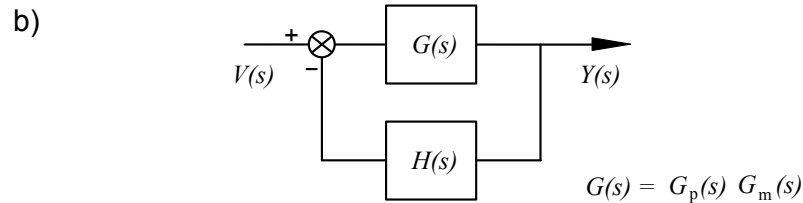
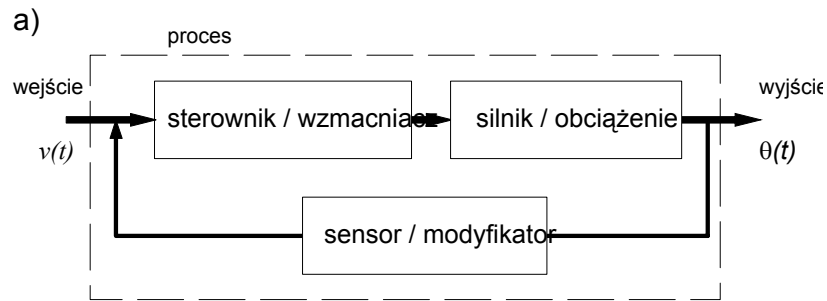


Źródło: GARDNER 1994

Rys. 3.4. Schematyczne przedstawienie silnika w układzie otwartym (a) i schemat blokowy jego sterowania (b)

Problem podczas sterowania zmiennej procesowej w układzie otwartym polega na tym, że nie możemy stwierdzić czy wyjście $\theta(t)$ ma pożądaną wartość. Jakość sterowania w układzie otwartym zależy więc od stabilności sterownika/wzmacniacza i elementów silnika/obciążenia. Dlatego korzystne jest sterowanie w układzie zamkniętym. Wymaga to jednak zastosowania sensora w linii sprzężenia zwrotnego, jak to widać na rys. 3.5 (a). Z obwodu sterowania na rys. 3.5 (b) możemy obliczyć różnicę $e(s)$ między wyjściem pożądanym i wyjściem zmierzonym przez sensor, przy czym

$$e(s) = V(s) - H(s)Y(s). \quad (3.6)$$



Źródło: GARDNER 1994

Rys. 3.5. Użycie sensora położenia do sterowania silnika prądu stałego w układzie zamkniętym (a), oraz schemat blokowy sterowania z elementem silnika $G(s)$ i elementem sprzężenia zwrotnego $H(s)$

W warunkach ustalonych $e(s) \approx 0$ (gdy $\text{czas} \rightarrow \infty$). Transmitancja systemu zawiera teraz dynamiczne właściwości sensora $H(s)$:

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}, \quad (3.7)$$

gdzie $G(s) = G_p(s)G_m(s)$.

Aby zastosować sensor do sterowania ruchem maszyny, należy więc znać i rozumieć jego odpowiedź dynamiczną. I tak transmitancja $H_1(s)$ liniowego sensora pierwszego rzędu wynosi

$$H_1(s) = \frac{A_s}{(1 + \tau_s s)}, \quad (3.8)$$

gdzie A_s reprezentuje wzmocnienie w stanie ustalonym, a τ_s stałą czasową. Dla $\tau_s < \tau$ odpowiedź całego systemu pozostaje nie zmieniona.

Takie proste modele są bardzo użyteczne do przybliżonego rozwiązywania problemów sensoryki w mechatronice. W wielu przypadkach konieczne jest jednak bardziej złożone podejście, np. za pomocą nieliniowych i/lub adaptacyjnych systemów sterowania. To leży jednak poza celem tego opracowania.

3.3 Mechaniczne wielkości pomiarowe i klasyfikacja urządzeń sensorycznych

Mechanicznych wielkości pomiarowych jest dużo. Najważniejsze z nich przedstawia tab. 3.1. Wielkości te są używane często do definiowania najważniejszych klas sensorów mechanicznych.

Tabela 3.1. Najważniejsze mechaniczne wielkości pomiarowe

położenie (pozycja), przemieszczenie	szywność, podatność
prędkość, szybkość	masa, gęstość
przyspieszenie	natężenie przepływu
siła, moment	kształt, chropowatość
napężenie, ciśnienie	lepkość
odkształcenie	inne (akustyczne/ponaddźwiękowe)

Źródło: GARDNER 1994

Sensory klasyfikuje się w zależności od funkcji jaką wykonują (tzn. do mierzenia czego służą), lub od ich zasady działania (np. indukcyjne, optoelektroniczne itp.). Zwykłym kryterium klasyfikacji jest rodzaj energii, którą niesie sygnał (mechaniczna, cieplna, elektryczna, promieniowania itd.). Dla konstruktora urządzenia mechatronicznego istotna jest klasyfikacja funkcjonalna. Chce on przede wszystkim wiedzieć o różnych rodzajach sensorów, np. do pomiaru przemieszczenia, a nie o ukrytych zasadach ich działania. Jest to bardziej praktyczne. Taka klasyfikacja może być również używana do klasyfikowania rodzajów aktorów używanych w systemach mechatronicznych.

Parametry mechaniczne w urządzeniu mechatronicznym, takie jak położenie, prędkość i siła, mogą być mierzone za pomocą sensorów o różnych zasadach działania. Cechą wspólną tych sensorów musi być jednak przekształcanie sygnału mecha-

nicznego w elektryczny i to najlepiej za pomocą mikrotechnologii układów scalonych (monolitycznych). W porównaniu do sensorów klasycznych mamy tu więc do czynienia raczej z mikrosensorymi. Nadal słuszne są tu jednak tradycyjne zasady pomiaru zewnętrznych właściwości mikrostruktur, takich jak pojemność czy indukcyjność (tab. 3.2). Dodatkowo wykorzystywana jest zmienność właściwości materiałowych (wewnętrznych) stosowanych w pomiarze.

Tabela. 3.2. Właściwości wykorzystywane w niektórych typowych sensorach mechanicznych

Natura	Właściwość (zasada działania)	Przykład
wewnętrzna:	rezonans (akustyczny)	miernik mikromasowy
	rezonans (sprężysty)	pomiary mikrougięć
	rezystywność	czujniki odkształceń (tensometry)
	piezorezystywność	czujniki ciśnienia
	piezoelektryczność	czujniki odkształceń
zewnętrzna:	pojemność	czujniki ciśnień
	indukcyjność	transformatory różnicowe
	reluktancja	Halla sensory położenia
	sprężenie magnetyczne	resolwery
	sprężenie optyczne	enkodery optyczne

Źródło: GARDNER 1994

Sensory przemieszczeń są używane szeroko tam, gdzie muszą być stworzone i utrzymane wymiary czy tolerancje w praktyce inżynierskiej. Zakres przemieszczeń może wymagać, np. użycia interferometru rentgenowskiego; przemieszczenia mikrometryczne mogą wymagać użycia interferometru laserowego; milimetrowe – są wyczuwane przez większość typowych rodzajów sensorów przemieszczeń; metrowe – mogą wymagać krótkofalowych urządzeń mikrofalowych, a ponadkilometrowe – fal dłuższych (radar).

3.4 Sensory pozycji i ich podstawowa rola w mechatronice

Z punktu widzenia mechatronizacji napędów mechanicznych szczególną rolę odgrywają *sensory pozycji* (położenia, drogi przemieszczenia), mniejszą – *sensory prędkości* i *sensory obecności*. Sensory pozycji elementu wykonującego ruch obrotowy nazywane są czujnikami obrotu, czujnikami kąta, resolwerami czy enkodera-

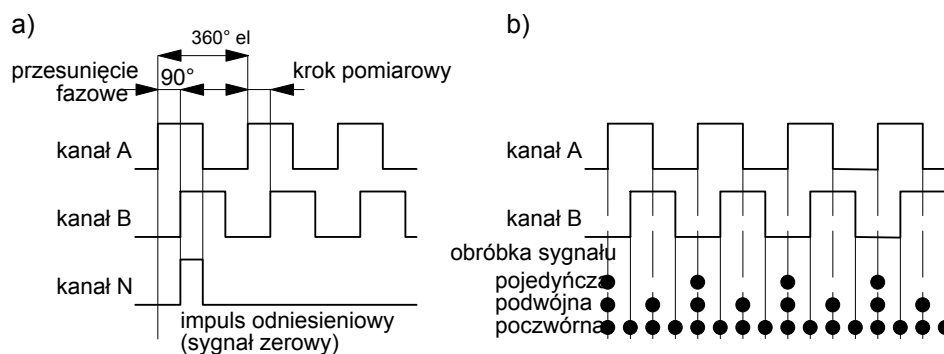
mi. Mierzą one drogi, długości, kąty i położenia. Sensory prędkości nazywane są zwykle prądnicami tachometrycznymi, tachogeneratorami czy tachometrami. Mierzą one prędkości kątowe i liczby obrotów. Wielkości te mogą być jednak łatwo uzyskiwane podczas obróbki sygnału sensorów położenia kąowego (przez różniczkowanie). Dlatego sensory te odgrywają rolę podstawową. Sensory obecności nazywane są zwykle wyłącznikami zbliżeniowymi czy magnetycznymi, a niekiedy sensorami binarnymi [HENGSTLER], ponieważ służą tylko do wykrywania i różnicznania stanu systemu w sensie odpowiedzi tak/nie, jest/nie ma, obecny/nieobecny itp. Poniżej przedstawimy podstawowe sensory pozycji w zastosowaniu do ruchu obrotowego, ponieważ jest to podstawowy ruch napędów mechanicznych. W połączeniu z przetwornikami ruchu obrotowego na posuwisty (zębatkami, kołami pomiarowymi, wrzecionami gwintowanymi, pasami zębatymi itp.) nadają się one także do pomiarów pozycji w ruchu posuwistym.

Mechanicznym sygnałem wejściowym sensora pozycji w ruchu obrotowym jest kąt obrotu, sygnałem wyjściowym – impuls elektryczny. Podczas zmiany pozycji o określony kąt (jeden krok) zawsze wydawany jest jeden impuls elektryczny. Przetwarzanie kąta obrotu na impuls elektryczny odbywa się zwykle na zasadzie *magnetycznej*, *pojemnościowej* lub, coraz częściej, *optoelektronicznej*.

We wszystkich tych zasadach istotną rolę odgrywa obracająca się tarcza, sprzężona sztywno z wałem silnika. W przypadku przetwarzania magnetycznego tarcza ta zawiera pola magnetyczne, które odczytywane są przez odpowiednią głowicę (np. wykorzystującą efekt Halla); w przypadku przetwarzania pojemnościowego mamy dwie tarcze, spełniające rolę stojana i wirnika, których obrót wzajemny powoduje zmianę pojemności układu, podobnie jak w kondensatorze obrotowym; w przetwarzaniu optoelektronicznym na tarczy naniesione są znaki (kreski, kod Grey'a). Tarcza obracając się przerywa promień świetlny, zwykle jest to promieniowanie podczerwone, wysyłany przez diodę nadawczą. Liczba kresek na tarczy określa rozdzielczość, czyli punkty pomiarowe w ramach jednego obrotu. Przerwania promienia świetlnego są odbierane i obrabiane przez układ elektroniczny. Na wyjściu mają one postać sygnału prostokątnego.

3.4.1 Sygnały pomiarowe i ich obróbka

Najprostsze sensory obrotu mają tylko jeden kanał wyjściowy (A na rys. 3.6). Są one stosowane wszędzie tam, gdzie nie wymaga się rozpoznawania kierunku obrotu, np. w licznikach dodających lub odejmujących czy w prędkościomierzach (tachometrach).



Rys. 3.6. Sygnały wyjściowe podczas obrotu w prawo (a) i możliwości ich obróbki (b)

Dwukanałowy sensor obrotu pracuje z dwoma układami odczytowymi i wysyła wytwarzane impulsy dwoma kanałami (A i B). Impulsy wyjściowe obu kanałów są przesunięte w fazie o 90 stopni. Z tego przesunięcia fazowego, za pomocą dołączonej elektroniki, można określić kierunek obrotu czujnika. Sensory dwukanałowe są stosowane wszędzie tam, gdzie konieczne jest rozpoznawanie kierunku obrotu, np. w licznikach często przestawianych lub w urządzeniach pozycjonujących.

Sensor trzykanałowy jest w zasadzie sensorem dwukanałowym z dodatkowym kanałem (N) dostarczającym jeden impuls na obrót. Impuls ten jest np. potrzebny do dokładnego ujęcia punktu odniesienia i jest nazywany sygnałem zerowym lub odniesieniowym. Sensory z sygnałem zerowym są często stosowane w systemach pozycjonowania.

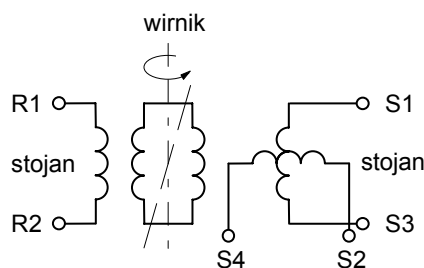
W celu wyeliminowania impulsów zakłócających niektóre połączenia wyjściowe wytwarzają sygnały odwrotne (\bar{A} , \bar{B} , \bar{N}).

Krokiem pomiarowym jest wartość między dwoma bokami impulsów A i B. Rozdzielczość dwukanałowego czujnika obrotu może być, za pomocą dołączonej elektroniki, zwiększona dwu- lub czterokrotnie (rys. 3.6b). Maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa czujnika obrotów zależy od: (1) prędkości dopuszczalnej z powodów mechanicznych, (2) minimalnej odległości między bokami prostokątnych sygnałów wyjściowych (dopuszczalnej dla elektroniki i biorącej się z tolerancji przesunięcia fazowego), oraz (3) liczby obrotów, która jest ograniczona częstotliwością impulsów.

3.4.2 Resolwery

Proste, magnetyczne przetworniki położenia kąowego (transformatory obrotowe) nazywane są resolverami. Dostarczają one analogowych sygnałów elektrycznych, zależnych od kąta obrotu. Przetworniki dostarczające sygnały cyfrowe, bardziej złożone i wielofunkcyjne, nazywane są enkoderami.

Resolver przypomina silnik elektryczny. Ma on twornik i uzwojenia pola. Pojedyncze uzwojenie twornika jest zasilane napięciem prądu przemiennego. Dwa uzwojenia pola są przesunięte wzajemnie o 90° (por. rys. 3.7). Dwa wyjścia będą generować fale sinusoidalne i kosinusoidalne, których poziom napięcia zmienia się zależnie od pozycji wirnika resolvera. Obwód elektryczny (konwerter resolvera) porównuje te dwie fale i przekształca napięcia pola w sygnał analogowy, proporcjonalny do kąta wirnika. Dokładność resolverów wynosi zwykle od 2 do 20 minut kątowych.



Źródło: MIKROMA

Rys. 3.7. Uzwojenia resolvera. R1-R2 – napięcia wejściowe; S1-S3, S2-S4 – napięcia wyjściowe

W zależności od postaci konstrukcyjnej rozróżnia się resolvery z własnym łożyskowaniem (łożyskowe) i bezłożyskowe. Pierwsze są przyłączane za pomocą sprzęgiełka do końcówki wału silnika. W drugich pierścieniowy wirnik jest nasadzany na wał a stojan osadzany w obudowie, bezpośrednio nad wirnikiem.

3.4.3 Enkodery inkrementalne i absolutne

Ze względu na jednoznaczność sposobu pomiaru położenia rozróżnia się enkodery inkrementalne (przyrostowe) i absolutne (bezwzględne). Pierwsze mierzą tylko przyrost położenia kąowego i zliczają liczbę obrotów od ustawionego punktu odniesienia. Nagłe wyłączenie napięcia elektrycznego, stan przejściowy czy jakiegokolwiek zakłócenie zewnętrzne powodują jednak niejednoznaczność wartości pomiarowych, ponieważ po ponownym włączeniu napięcia konieczne jest zawsze ustawienie punktu odniesienia (wyzerowanie). Wady tej nie mają enkodery abso-

lutne. Każdemu pojedynczemu krokowi pomiarowemu przyporządkowany jest tu bowiem jednoznacznie zakodowany sygnał cyfrowy.

Po ponownym włączeniu napięcia wartość pomiarowa pozycji enkodera absolutnego jest natychmiast do dyspozycji. Jeżeli taki system pomiarowy jest w stanie wyłączonym poruszany mechanicznie, to po ponownym włączeniu napięcia elektrycznego położenie wału daje się odczytać szybko i bezpośrednio.

Wśród enkoderów absolutnych rozróżnia się enkodery typu *jednoobrotowego* (singleturn) i *wielooobrotowego* (multiturn). W enkoderach jednoobrotowych jeden obrót (360°) jest kodowany na n kroków. Po obrocie o 360° kodowanie się powtarza. W enkoderach wielooobrotowych, oprócz pomiaru jednego obrotu, mogą być ujęte w zakodowany sposób inne obroty. Jest to wymagane wtedy, gdy liczba kroków pomiarowych czujnika jednoobrotowego nie wystarcza, np. w przypadku długich dróg ruchu roboczego.

Pomiar w enkoderze absolutnym odbywa się zwykle na zasadzie *pojemnościowej* lub *optoelektronicznej*. W przypadku enkoderów pojemnościowych część pomiarowa składa się, podobnie jak w kondensatorze, z dwóch różnych elektrod i powietrza jako dielektryka. Jedna elektroda (stator) jest nieruchoma, druga zaś – ukształtowana w postaci tarczy (rotor) – jest obracana względem statora. Obracanie rotora powoduje zmianę pojemności. Zmiana ta, obrobiona przez dołączony układ elektroniczny, jest do dyspozycji w formie zakodowanej informacji. Pojemnościowa zasada pomiaru daje dużą niezawodność czujnika. Nie ma żadnych części o małej trwałości, jak żarówki i diody świecące. Trwałość czujnika jest określona trwałością łożysk tocznych. Inną zaletą pojemnościowej zasady pomiaru jest mały pobór mocy i związane z tym małe nagrzewanie się.

Optoelektroniczne enkodery absolutne działają tak samo jak optoelektroniczne enkodery inkrementalne, ale na tarczy mają wiele ścieżek. Ścieżki te, odczytywane równolegle, dają zakodowaną informację o kącie. Liczba ścieżek zależy od liczby kresk na jeden obrót. Ścieżki mają postać kodu dwójkowego (kod Grey'a). W stosunku do innych kodów ma on tę zaletę, że jeden krok zmienia każdorazowo tylko jeden bit (ścieżkę). Unika się przez to błędów odczytu. Optyczne enkodery absolutne typu multiturn, obok tarczy do pomiaru w zakresie 360° , mają dodatkowe tarcze do ujęcia dalszych obrotów, podobnie jak w samochodowym liczniku kilometrów. Określona w ten sposób wartość pomiarowa jest obrabiana w zintegrowanych zespołach elektronicznych i podana użytkownikowi, jako wartość absolutna, przez standardowe interfejsy danych.

Nowoczesne enkodery absolutne są czasem wyposażone w dodatkowe sygnały inkrementalne. Dwa kanały o 90° przesunięciu fazowym mogą być wykorzystane do określania kierunku prędkości czy dla funkcji kontrolnych. Rozdzielczość

enkoderów absolutnych dochodzi do 24 bitów, co odpowiada 16777216 krokom. Istnieją także enkodery programowalne, ze zintegrowanym mikroprocesorem, np. [T+R ELECTRONIC]. Programowanie może odbywać się za pomocą komputera osobistego.

Enkodery inkrementalne mogą być także używane do pomiaru prędkości przez zliczanie impulsów w określonym czasie. W układach ze sprzężeniem zwrotnym czas ten musi być mały, aby dawać krótkotrwałą średnią prędkości chwilowej. Ponieważ obroty liczone są z dokładnością jednego obrotu (plus minus jeden obrót), dla małych liczb zliczeń występują duże błędy. Dlatego do pomiaru prędkości lepiej nadają się tachometry.

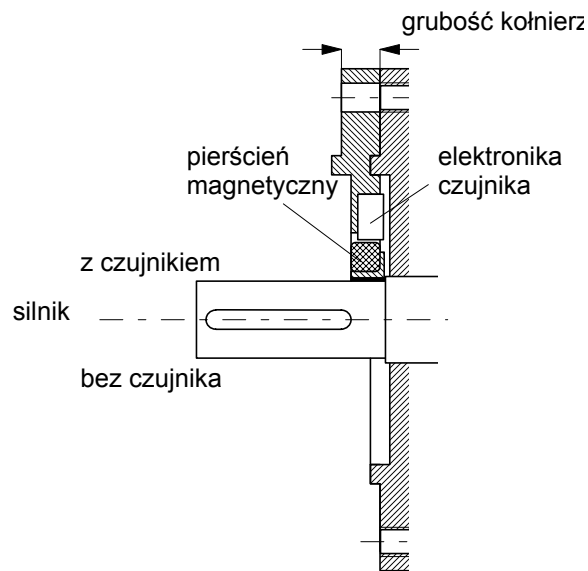
Najszerzej stosowanym sensorem położenia staje się enkoder optyczny. Jest on konkurencyjny cenowo z resolverami, a wyjście binarne czyni go wygodnym do interfejsowania mikroprocesora. W enkoderze optycznym nie występuje tarcie, a moment bezwładności jest znacznie niższy niż moment enkodera magnetycznego. Ponadto nie występują problemy sprzęgania czy rezonansu mechanicznego. Pojawiają się już także enkodery zintegrowane z silnikiem elektrycznym, a nawet kompletne jednostki silnik-tachometr-enkoder, np. [ESCAP].

3.4.4 „Inteligentny” kołnierz silnika jako czujnik impulsów obrotu

Zamontowanie czujnika impulsów(enkodera), który określa kąt i kierunek obrotu wału silnika, sprawia często kłopot i wymaga zmian mechanicznych przy silniku. Ponadto enkodery umieszczane są wtedy zwykle na końcach wałów, w miejscach narażonych na uszkodzenia. Aby tego uniknąć, skonstruowano czujniki, które dają się zamontować w kołnierzu łączącym obudowę silnika elektrycznego z napędzaną maszyną [EICKMEIER].

Taki magnetyczny czujnik impulsów składa się tylko z dwóch elementów: wąskiego kołnierza, pasującego do kołnierza silników znormalizowanych, oraz czterobiegowego pierścienia magnetycznego, zamocowanego na tulei stalowej i nasadzonego bez luzu na wał za pomocą dostarczanego pierścienia (rys 3.8).

Do zamocowania wykorzystano tu jedyny element, którego wymiary są znormalizowane: kołnierz silnika. Oferowane są także wersje dla silników na łapach. W każdym przypadku montażu nie wymagane są żadne zmiany na silniku.



Źródło: LINKE 1994

Rys. 3.8. „Inteligentny” kołnierz silnika elektrycznego

Podczas pracy silnika pierścień magnetyczny czujnika obraca się z razem wałem. W kołnierzu znajdują się dwa sensory Halla, które przejmują sygnały pierścieni magnetycznych i w ten sposób ujmują liczbę i kierunek obrotów. Zasada ta sprawdziła się dobrze w czujnikach impulsów. Jest ona niewrażliwa na sygnały obce i zakłócające oraz – dzięki bezstykowej technice pomiarowej – wolna od obsługi i zużycia.

Na wyjściu czujnika mamy do dyspozycji dwa sygnały prostokątne oraz ich odwrotności. Aby można było rozpoznać także kierunek obrotów, oba sygnały przesunięte są wzajemnie o 90° . Na jeden obrót wysyłanych jest maksymalnie 80 impulsów. Zasada ta jest niezawodna, ponieważ podczas wytwarzania impulsu w pierwszym rzędzie miarodajna jest siła i kierunek pola magnetycznego, tzn. przed każdym nowym wyzwoleniem impulsu musi się najpierw odwrócić kierunek pola magnetycznego. Próg wyzwolenia jest jednakowy dla obu kierunków, przez co stosunek impulsu do przerwy ma się jak 1:1. Jeżeli urządzenie do obróbki sygnału oferuje możliwość oceny boku impulsu, to liczba impulsów może być zwiększona czterokrotnie.

Sygnały wyjściowe z czujnika mogą być zdejmowane zarówno z wejść NPN, PNP i NPN/PNP, jak i przez interfejs RS-422. Napięcie pracy może zmieniać się między

10 i 24V DC. Nie potrzeba więc stosować różnych typów enkoderów dla różnych urządzeń do obróbki sygnału. Przyłączenie programowalnego sterownika logicznego (PLC) nie sprawia problemu. Sygnały są przenoszone, do wyboru, przez kabel lub przyłącze wtykowe. Urządzenie do obróbki sygnału może być oddalone od czujnika maksymalnie 1000 mm. Za pomocą sensorów tego typu można regulować nie tylko położenia, ale także można np. sterować dozowaniem, równobieżnością, oraz regulować moment.

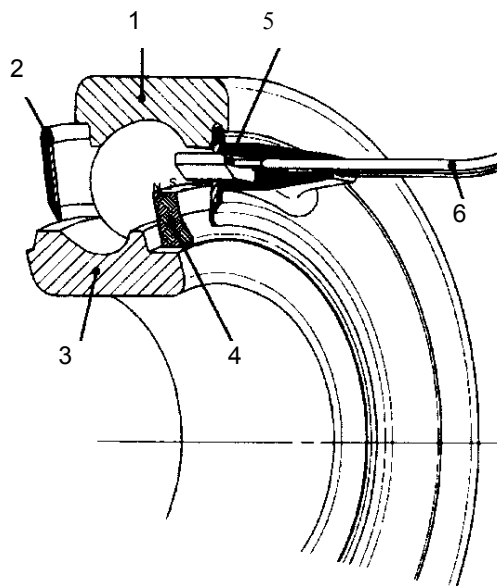
Do obróbki sygnału, obok typowych urządzeń, może być zastosowana także przetwornica częstotliwości, która dysponuje zintegrowanym sterownikiem położenia i w wersji standardowej może ustawiać osiem pozycji z dokładnością impulsu. Otrzymujemy wtedy bezzderzakowe sterowanie pozycyjne, które wykorzystuje zalety standardowego silnika asynchronicznego (zwartość, korzystna cena, brak konieczności konserwacji, wysoki rodzaj ochrony). Sterowanie to może rozwiązywać zadania, które zarezerwowane były dotychczas dla kosztownych serwo-silników. Ponieważ system pozycjonowania działa bezpośrednio, bez uprzedniego biegu pełzającego, osiągane są bardzo krótkie okresy cyklu.

3.4.5 Łożysko toczne z sensorem

Łożysko toczne jest organem, w którym powstają względne ruchy innych elementów, lub przez które przechodzą siły obciążające. Jako organ dość precyzyjny jest idealnym miejscem do zdobycia informacji, takich jak liczba obrotów, kierunek obrotów, pozycja absolutna, obciążenie itd.

Łożysko toczne z sensorem jest kombinacją mechaniki i sensoryki. Koncepcja takiego łożyska, opracowanego przez firmę SNR [EICKMEIER 1994], polega na integracji dwóch funkcji w jednym nośniku: funkcji łożyska tocznego i generowania sygnału elektrycznego (rys. 3.9). Łożysko sensorowe ma takie same wymiary jak standardowe jednorzędowe łożysko kulkowe. Jego zastosowanie obniża koszty funkcji pomiarowych i nadzorczych i przez to rozszerza możliwości stosowania łożysk.

Opracowanie łożyska sensorowego polegało na takiej integracji sensora i łożyska standardowego, aby pozostała absolutna wymienialność łożysk. Uzyskano to przez sensor efektu Halla. Sensor ten współpracuje z pierścieniem magnetycznym (namagnesowane są bieguny NS), naciągniętym na wewnętrzny pierścień łożyska.



Źródło: EICKMEIER 1994

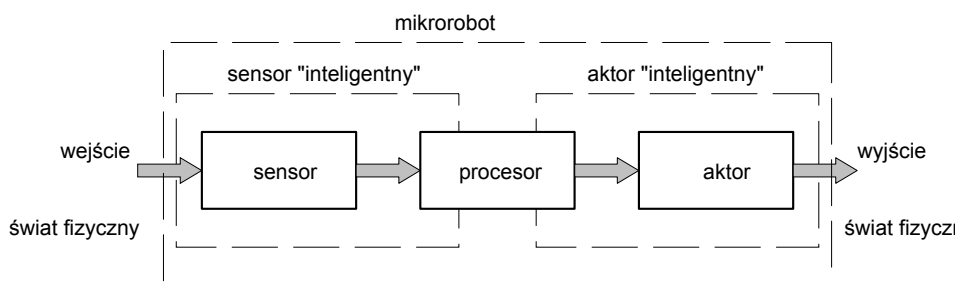
Rys. 3.9. Budowa łożyska-sensora: 1 – nieruchomy pierścień zewnętrzny, 2 – uszczelnienie, 3 – wewnętrzny pierścień łożyska, 4 – wielobiegunowy pierścień magnetyczny, 5 – sensor efektu Halla, 6 – kabel przyłączeniowy

W obudowie sensora są połączone cztery funkcje elektroniczne: element Halla, wzmacniacz, wyzwalacz i wyjście. Element Halla wbudowany jest w uszczelnienie nieruchomego pierścienia zewnętrznego. W ten sposób wytwarzane jest prostokątne przemiennie napięcie, którego częstotliwość zależy od liczby obrotów wewnętrznego pierścienia łożyska. W ten sposób powstało łożysko, które dodatkowo spełnia funkcję inkrementalnego czujnika impulsów. Koniec półmetrowego trójżyłowego kabla płaskiego jest świadomie otwarty, aby umożliwić użytkownikom indywidualne przyłączenie do ich typu sterowania. Rozdzielczość wynosi 32 okresy cyfrowe na obrót i jest ograniczona mechanicznie magnesowaniem pierścienia magnetycznego.

3.5 Mikrosensory

Redukcja rozmiarów sensora prowadzi zwykle do wzrostu obszaru jego zastosowania. To z kolei rodzi nowe potrzeby w zakresie sensorów małych (mikrosensorów) i zintegrowanych, które w pełni wykorzystują zalety technologii obwodów scalonych.

Rysunek 3.10 pokazuje zasadnicze elementy sensora zintegrowanego z procesorem i aktorem. Integracja sensora i części procesora jest często pożądana, ponieważ może ona poprawić niektóre charakterystyki sensora, na przykład zlinearyzować jego wyjścia, kompensować temperaturę czy wilgotność.



Źródło: GARDNER 1994

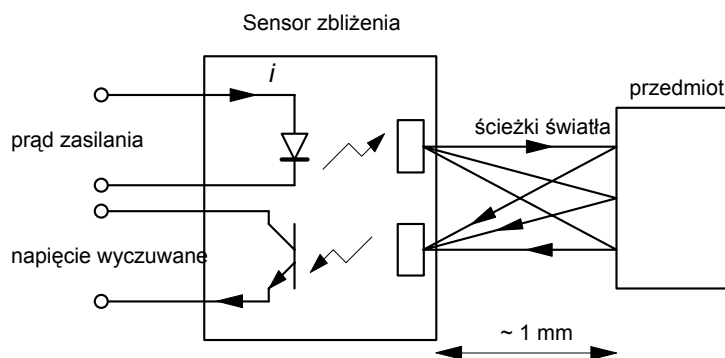
Rys. 3.10. Schemat urządzenia elektronicznego powstałego przez integrację elementów w systemie pomiarowym

Sensor z częściowo lub całkowicie zintegrowanym procesorem nazywany jest *senso-rem zintegrowanym* lub „*inteligentnym*” (smart sensor) [GARDNER 1994]. Podobnie zintegrowany aktor może być nazywany *aktorem „inteligentnym*” (smart actuator). Możliwa jest całkowita integracja sensora, procesora i aktora. Głównym problemem jest jednak mała moc aktora. Mimo to realne wydają się zintegrowane systemy pomiarowe czy mikrouządzenia z bardziej skomplikowaną architekturą procesora (np. sterowanie w układzie zamkniętym), pomyślane jako mikroroboty czy mikroautomaty.

Szeroko rozpowszechnione pojemnościowe i indukcyjne sensory zbliżenia można zaliczyć raczej do miniaturowych niż do mikrosensorów. Sensory te mierzą obecność obiektu, który modyfikuje ich pojemność wyjściową i operuje w zakresie od 0,1 do 10 mm. Pojemnościowy pomiar przemieszczenia jest szeroko stosowany w mikrosensorach, ale zwykle nie do pomiaru przemieszczeń, lecz raczej innych wielkości względnych. Przemieszczenie np. jest mierzone pojemnościowo w wielu strukturach mikromechanicznych, takich jak wsporniki, przesłony i mikrougięcia rezonansowe.

Opracowano wiele monolitycznych sensorów do pomiaru pozycji lub bliskości obiektów. Zasada wykrywania polega albo na (1) przerwaniu bezpośredniej wiązki światła, (2) na odbiciu zwierciadlanym, albo (3) na rozproszeniu na powierzchni. Na rysunku 3.11 pokazany jest schemat skanującego optycznego przełącznika roz-

praszającego. Fotodioda emituje promieniowanie podczerwone, które jest rozpraszane na obiekcie (odległym od 1 do 5 mm) i zbierane przez fototranzystor. Pomiar pozycji tą metodą jest znacznie trudniejszy niż pomiar obecności. Podstawowa metoda odbiciowa używa adaptera fototranzystorowego i w ten sposób wytwarza nieliniowe wyjście, które zależy od płaskości obiektu odbijającego. Nie jest to metoda zbyt dokładna i ogniskowanie wiązki lasera, która jest wykrywana przez siatkę z diod świecących (LED array) byłaby lepsza. Użycie wiązki laserowej w metodzie triangulacyjnej czy interferometrycznej może być widziane jako mikrosensor.



Źródło: GARDNER 1994

Rys. 3.11. Monolityczny rozpraszający sensor zbliżeniowy

Mikrosensory mechaniczne coraz szerzej używają przemieszczenia jako pośredniego parametru do pomiaru innych wielkości. Powodem zasadniczym jest to, że użycie mikrostruktur silikonowych (lub ich właściwości materiałowych) do pomiaru przemieszczenia możliwe jest tylko w małym zakresie dynamicznym (od 0,1 do 10 μm) Ogranicza to ich zastosowanie w wyspecjalizowanych zastosowaniach techniki mikrosystemowej, takich jak np. mechanizmy sensoryczne w mikro-aktorach.

Mały sensor fotoelektryczny może być używany do pomiaru kąta czy pochylenia jakiejś powierzchni. Zasada jest prosta. Pęcherzyk, zamknięty wewnątrz półkulistej poziomnicy spirytusowej porusza się wraz ze zmianą kąta pochylenia. Światło z diody jest odbijane od niego i rzuca cień na cztery fotodiody. Wyjście z czterech fotodiod jest następnie odnoszone do kąta i kierunku pochylenia przez krzywą kalibracji lub tabelę.

3.6 Podsumowanie

Pomiar przemieszczeń ma fundamentalne znaczenie dla urządzeń mechatronicznych. Przetworniki przemieszczeń są używane w wielu produktach życia codziennego. Zwykły wyłącznik może być przecież rozpatrywany jako prosty rodzaj sensora pozycji. Sensory przemieszczenia są używane w światłach do kierowania ruchu drogowego, w urządzeniach przeciwwłamaniowych (alarmach), samochodach, robotach i medycynie. Większość tych przykładów pokazuje użycie sensora przemieszczeń jako monitora. Jednak innym dużym obszarem zastosowań jest sterowanie w układzie otwartym czy zamkniętym, czyli mechatronika. Na przykład enkodery optyczne są zwykle używane do pomiaru pozycji aktora czy wału napędowego. W ten sposób aktory i systemy napędowe mogą być sterowane za pomocą sprzężenia zwrotnego, położeniowego i prędkościowego. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia mechatroniki.

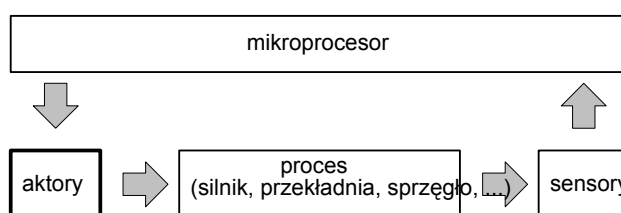
Jeżeli rozważyć cechy, jakimi powinny charakteryzować się sensory w układach mechatronicznych, to widać, że szczególnego znaczenia nabierają: integracja z procesem, dynamika, rozdzielczość, odporność mechaniczna, termiczna, elektromagnetyczna (kompatybilność elektromagnetyczna) małe zużycie, bezdotykowość, miniaturyzacja, łatwe przejście do cyfrowej obróbki sygnału, zdolność do korzystania z magistral danych, samonadzoru i rozpoznawania uszkodzeń. Coraz ważniejsza staje się zintegrowanie funkcji sensorycznej i obróbki sygnału na jednym wspólnym nośniku systemu. Prowadzi to do dalszej miniaturyzacji, mniejszej liczby połączeń elektrycznych i większej niezawodności.

4. Aktoryka

W rozdziale tym przedstawimy najważniejsze zagadnienia dotyczące członów wykonawczych, czyli aktorów. Zaczniemy od definicji i istoty aktora. Przedstawimy ich rolę w urządzeniach mechatronicznych, klasyfikację i zasady działania. Omówimy strukturę i funkcje mechatronicznego systemu nastawczego. Na koniec zajmiemy się bliżej dwoma podstawowymi grupami aktorów: elektromagnetycznymi i pneumatycznymi.

4.1 Definicja i istota aktora

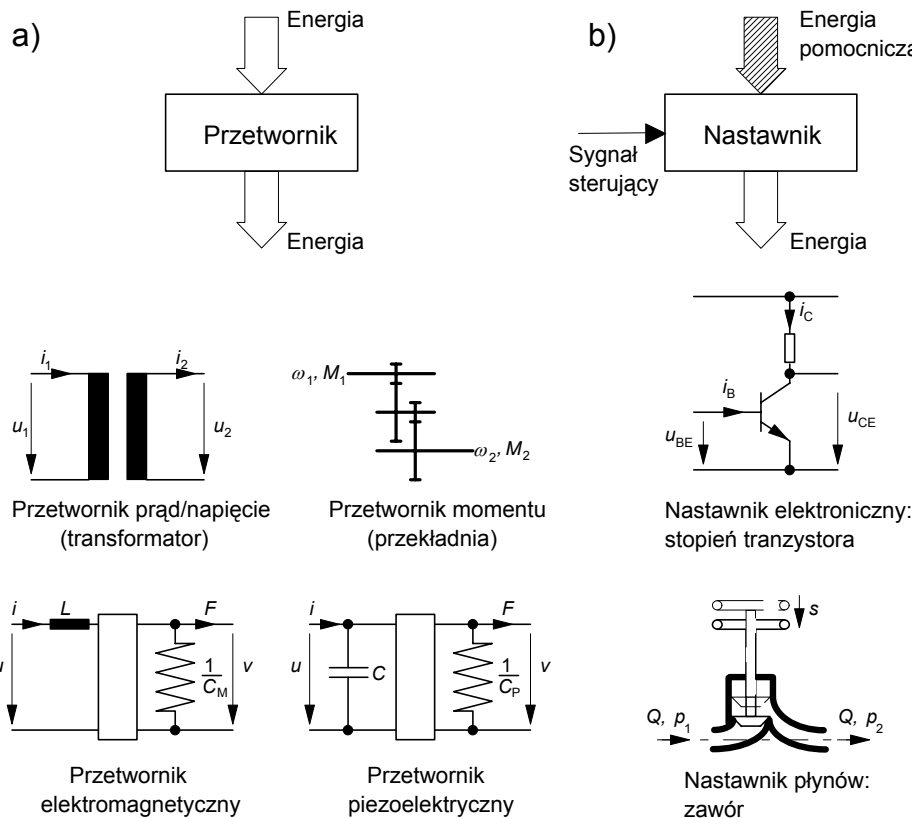
Aktor (ang. *actuator*, niem. *Aktor*, franc. *actionneur*) jest elektronicznie sterowanym członem wykonawczym. Jest on łącznikiem między urządzeniem przetwarzającym informacje (mikroprocesorem) i procesem, którego parametry trzeba zmienić (nastawić) (rys. 4.1).



Źródło: RAAB, ISERMANN 1993

Rys. 4.1. Aktory jako człon łączący (mikro)elektroniczne przetwarzanie informacji i nastawiany proces

Za pomocą aktorów można nastawiać w określony sposób strumienie energii, przepływy masy czy objętości. Wielkością wyjściową aktorów jest zwykle energia lub moc mechaniczna (człon z niemechaniczną energią/mocą wyjściową, np. półprzewodniki mocy, mogą być również bez żadnej sprzeczności zaliczane do aktorów). Wejście aktora jest zawsze sterowane elektrycznie, prądami czy napięciami odpowiadającymi mikroelektronice (np. poziom TTL). Ta ostatnia cecha odróżnia aktory od „normalnych” członów nastawczych (nastawników) i nadaje im cechy systemowe [JANOCHA 1992].



Źródło: JANOCHA 1992

Rys. 4.2. Elementarne człony funkcjonalne aktora: a – przetwornik energii, b – nastawnik energii

Struktura aktorów może być opisana przez wprowadzenie elementarnych członów funkcjonalnych: przetwornika energii i nastawnika energii (rys. 4.2). W przetworniku energii wielkość wejściowa i wyjściowa jest zawsze energią; albo tego samego rodzaju, jak w przetworniku momentu obrotowego czy przetworniku prądu, albo różnego rodzaju, jak w przetwornikach elektromagnetycznych czy piezoelektrycznych (p. rys.4.2a). W nastawniku energii wielkość wyjściowa jest wprawdzie również energią, ale ta ostatnia pochodzi jednak z pomocniczego źródła i jest sterowana wielkością wejściową jak w przypadku tranzystorów czy zaworów (rys. 4.2b).

4.2 Rola aktorów w urządzeniach mechatronicznych

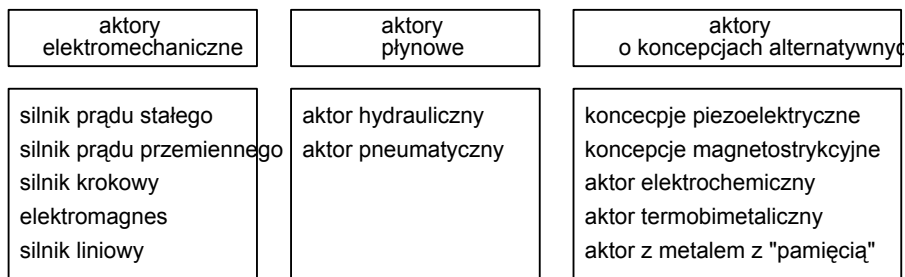
Właściwości aktorów istotnie wpływają na wydajność i gotowość całego urządzenia mechatronicznego. Dlatego aktry zaczynają zajmować kluczową pozycję we wszystkich obszarach nowoczesnej automatyzacji procesów. Optymalizacja dotychczasowych i realizacja nowych funkcji sterowniczych i regulacyjnych wymaga szerszego zastosowania lepszych i tańszych aktorów. 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 dobrą dynamikę, 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 aktor 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 aktry „inteligentne”. Ich obszar funkcji jest rozszerzany przez intensywne, cyfrowe przetwarzanie informacji. Istotnym elementem aktora staje się oprogramowanie. Obejmuje ono zarówno algorytm zdolny pracować w czasie rzeczywistym jak i sposób projektowania regulatora. W technice nastawiania coraz większą rolę odgrywa oprogramowanie.

Urządzenia mikroprocesorowe (komputerowe) są coraz tańsze. Konieczna wydajność obliczeniowa czy komunikacyjna jest łatwa do uzyskania. Opracowuje się nowe algorytmy regulacji i poprawia istniejące. Opierają się one na odpowiednich modelach aktora i skuteczniej wykorzystują fizykalne 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 aktora. Dodatkowo okazuje się, że dostępne sygnały pomiarowe można zastosować do nadzoru i diagnozy urządzenia nastawczego. I to bez dodatkowych pomiarów.

4.3 Klasyfikacja i zasady działania aktorów

Aktory przetwarzają analogowe lub cyfrowe sygnały urządzeń sterowniczych w mechaniczne wielkości wejściowe (drogę, siłę, kąt, moment obrotowy). Poziom mocy tych wielkości znacznie przekracza sygnał wejściowy. Potrzebne do tego wzmocnienie mocy jest osiągane głównie na drodze elektrycznej, hydraulicznej lub pneumatycznej. W zależności od energii pomocniczej można stosować różne zasady nastawiania i budować różne aktory. Z grubsza można je podzielić na: elektromechaniczne, hydrauliczne i pneumatyczne, oraz niekonwencjonalne (rys. 4.3).



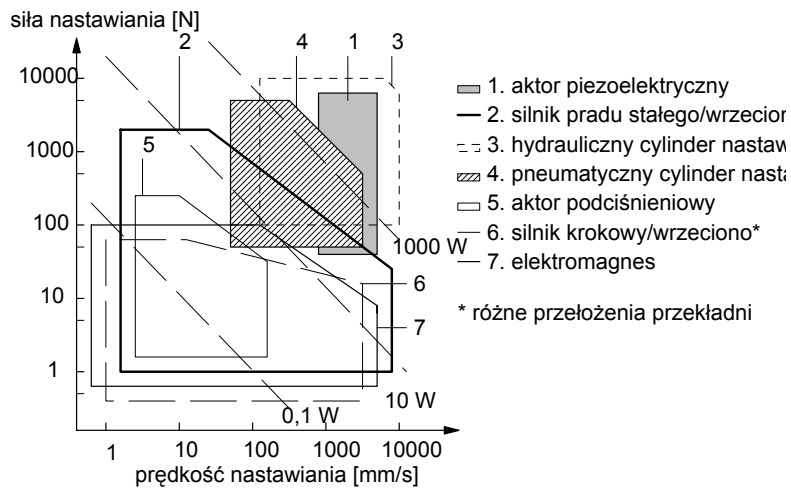
Źródło: ISERMANN, RAAB 1993

Rys. 4.3. Zasady działania aktorów o małej mocy (<10 kW)

W powstających w ten sposób rozwiązaniach technicznych siła nastawiania jest funkcją prędkości nastawiania (rys. 4.4). Umożliwia to ocenę mocy nastawczej i wyjściowej (siła×prędkość) aktorów różnego typu.

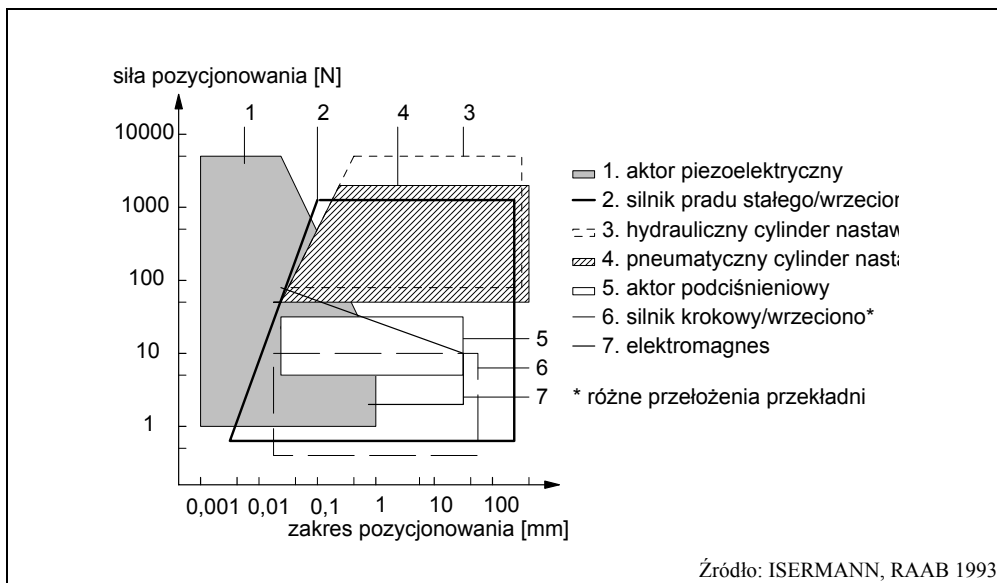
Porównanie siły nastawiania w zależności od typowych zakresów nastawiania (pozycjonowania) pokazuje rys. 4.5. Rysunek ten zawiera także dokładność pozycjonowania, reprezentowaną jako lewy brzeg osi x. Najszerszy zakres, od mikrometrów do metrów, mają aktory elektromechaniczne. Największą dokładność pozycjonowania wykazują aktory piezoelektryczne, ale tylko dla bardzo małych zakresów pozycjonowania.

Stosunek mocy aktora do jego masy pokazuje rys. 4.6. Przewodzą aktory płynowe. Aktory elektromagnetyczne i elektromechaniczne wypadają tu niezbyt korzystnie. Pomija się przy tym zalety, wynikające ze sposobu zasilania aktorów.



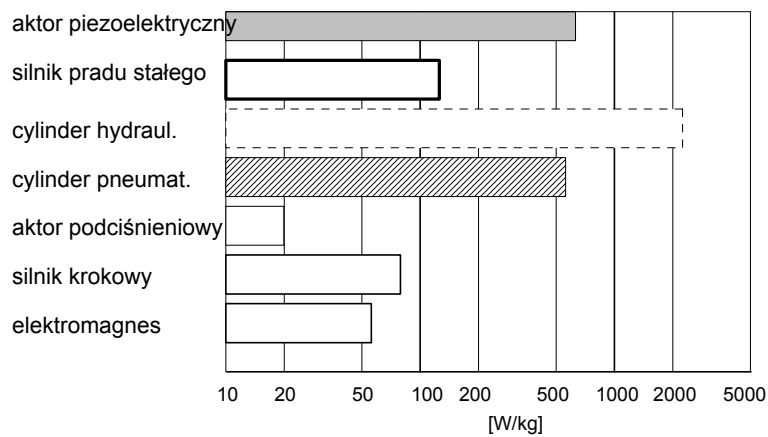
Źródło: ISERMANN, RAAB 1993

Rys. 4.4. Zależność między siłą i prędkością nastawiania dla typowych aktorów



Źródło: ISERMANN, RAAB 1993

Rys. 4.5. Zależność między siłą i zakresem pozycjonowania dla typowych aktorów



Źródło: ISERMANN, RAAB 1993

Rys. 4.6. Stosunek mocy do wagi dla typowych aktorów (bez uwzględniania zasilania)

4.4 Mechatroniczny system nastawczy – synteza napędu nastawczego i mikroelektroniki

Ogólne wymaganie, które powinien spełniać aktor, można sformułować następująco: duża dokładność nastawiania (pozycjonowania) przy możliwie dobrej dynamice nastawiania. Wymaganie to można z reguły spełnić tylko przez pracę aktora w zamkniętym obwodzie sterowania położeniem (pozycją). Czynniki, które ograniczają jakość regulacji prawie wszystkich typów aktorów, są:

- tarcie i straty w przekładniach mechanicznych i przewodnicach,
- efekty histerezy i nasycenia w określonych materiałach,
- nieliniowe statyczne charakterystyki,
- zmiana zachowania się procesu wskutek zmienności punktu pracy parametrów obiektu regulowanego lub czynników zewnętrznych, takich jak: zużycie, starzenie, temperatura, wahania energii pomocniczej.

Czynniki te można wyeliminować lub skompensować przez zastosowanie nowoczesnej mikroelektroniki. Pożądane przy tym powiązanie napędu nastawczego, komputera i oprogramowania nazywane jest dalej *mechatronicznym systemem nastawczym*. Jest to przestrzennie zintegrowana jednostka funkcjonalna, charakteryzująca się tym, że strumień siły jest, tak jak dotychczas, przejmowany przez elementy mechaniczne, przepływ zaś informacji następuje na drodze elektronicznej.

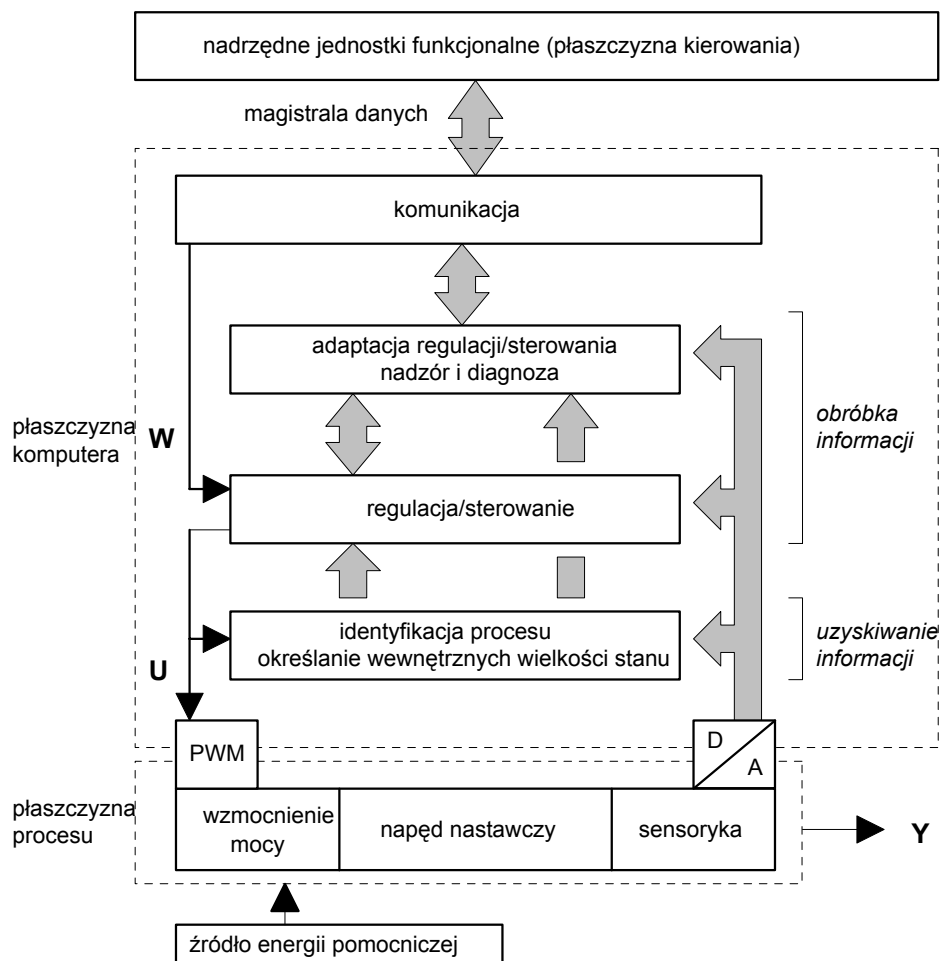
4.4.1 Podstawowa struktura mechatronicznych systemów nastawczych

Ogólna struktura mechatronicznego systemu nastawczego przedstawiona jest na rys. 4.7. Działania w systemie zachodzą na płaszczyźnie procesowej i płaszczyźnie komputerowej. W płaszczyźnie procesowej znajduje się nastawiana składowa z wyjściem mechanicznym Y. Podczas projektowania istotne jest najpierw ustalenie mocy, siły i zakresu nastawiania w specyficznych warunkach określonej maszyny. Ważna jest dysponowana energia pomocnicza, przestrzeń zabudowy itd. Oprócz tego istotne są różne aspekty systemowe. Wspomagają one kombinację mikroelektroniki z mechaniką i przez to przyczyniają się do zwiększenia elastyczności, kompatybilności i zwartości urządzenia. Chodzi tu o takie działania jak:

- przeniesienie zadań do mikrokomputera i przez to redukcja elementów składowych (np. wstępna obróbka sygnału przez filtry cyfrowe, podrzędne cyfrowe lub analogowe obwody regulacji itp.);
- integracja sensoryki i wzmocnienie mocy w napędzie nastawczym;
- interfejsowanie płaszczyzny procesowej z komputerową (jak wydawanie sygnału nastawczego o modulowanej szerokości impulsu, przetworzenie sygnałów pomiarowych z analogowych na cyfrowe (A/D) w sensorze itd.).

Na płaszczyznę procesową nakłada się płaszczyzna komputerowa. Jest ona umieszczona albo w zewnętrznym urządzeniu sterującym, albo, w przypadku idealnym, zintegrowana przestrzennie z płaszczyzną procesową (zintegrowany mechanicznie mikroelektroniczny system nastawczy). Płaszczyzna komputerowa obejmuje algorytmy do uzyskiwania i obróbki informacji. Komunikuje się ona z odpowiednimi sterownikami (controllers) przez szybkie magistrale danych z zewnętrznymi jednostkami funkcjonalnymi.

Przetwarzanie informacji w mechaniczno-mikroelektronicznych systemach nastawczych może być prowadzone w dwu płaszczyznach. W dolnej następuje regulacja lub stabilizacja ruchu nastawczego w czasie rzeczywistym. Na to nakłada się adaptacja regulacji oraz dozоровanie i diagnozowanie systemu nastawczego. W przeciwieństwie do konwencjonalnych urządzeń nastawczych stosowane są rozbudowane algorytmy. Opierają się one na matematycznym modelu procesu, którego parametry określone są metodami uzyskiwania informacji o systemach rzeczywistych.



Źródło: RAAB, ISERMANN 1993

Rys. 4.7. Podstawowa struktura i przepływ informacji w mechatronicznych systemach nastawczych (W – wielkość prowadząca; U – wejście elektryczne, sygnał nastawczy; Y – wyjście mechaniczne)

4.4.2 Funkcje mechatronicznych systemów nastawczych

Podstawowymi funkcjami mechatronicznych systemów nastawczych są:

- sterowanie,
- regulacja pozycyjna i regulacja podrzędnych systemów częściowych (regulacja kaskadowa),
- ograniczanie sygnału nastawczego i dozorowanie wartości granicznej.

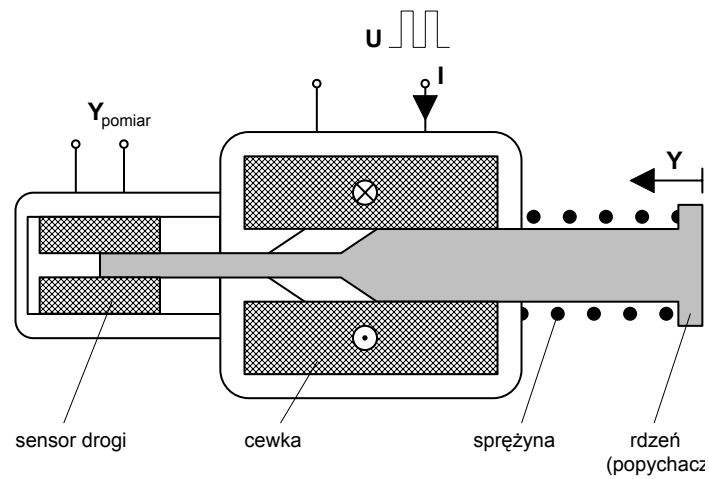
Funkcje te formalnie odpowiadają funkcjom konwencjonalnych urządzeń nastawczych. W szczególności mogą jednak one obejmować metody regulacji, których nie można zrealizować na drodze analogowej.

Z drugiej strony mamy tu do dyspozycji funkcje dodatkowe, które uwidaczniają zalety powiązania mechaniki z mikroelektroniką. Funkcje te opierają się one na pozyskiwaniu informacji i budowaniu sposobów samoczynnego nastawiania regulatora, adaptacji, dozorowaniu i diagnozie. Chodzi tu przede wszystkim o metody: (1) regulacji samonastawnej, (2) korekcji charakterystyk statycznych, (3) kompensacji tarcia, histerezy i strat, oraz (4) dozoru i diagnozy aktora [ISERMANN, RA-AB 1993].

4.5 Aktory elektromagnetyczne

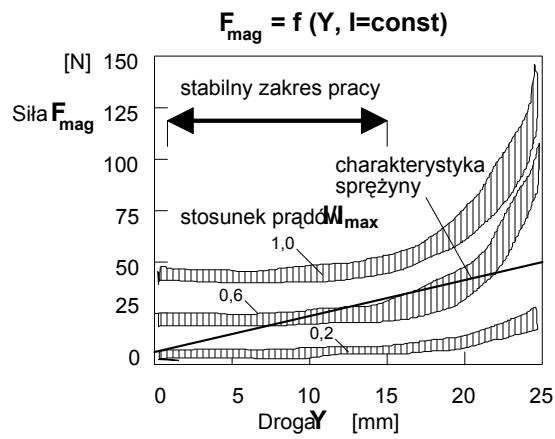
Aktory elektromagnetyczne przetwarzają elektryczny sygnał wejściowy w mechaniczny ruch wyjściowy. Zmiana położenia czy kąta następuje bardzo szybko (dobra dynamika), co wykorzystywane jest np. w zaworach pneumatycznych czy hydraulicznych. Ponieważ nie istnieją żadne alternatywne techniki, oferujące porównywalną możliwość wykonywania pracy przy odpowiednio wysokiej dynamice nastawiania i zwartości, napęd elektromagnetyczny zaczyna odgrywać kluczową rolę w realizacji nowych koncepcji sterowania np. silnikami spalinowymi czy systemami zawieszenia i bezpieczeństwa w pojazdach.

Prosty elektromagnes jest zwykle urządzeniem dwupołożeniowym, stosowanym tylko dla ruchów przełączających między krańcowymi położeniami zderzaków rdzenia (rys. 4.8). Ponieważ ma on sprężynę powrotną, teoretycznie może wykonywać ciągły ruch nastawczy w całym zakresie \mathbf{Y} . Zależność siła-prąd-droga nie jest jednak prosta. Wykazuje ona silną nieliniowość i wyraźną histerezę magnetyczną. Z tego powodu stabilna praca, przy zastosowaniu konwencjonalnych metod regulacji, jest możliwa tylko w dolnej, proporcjonalnej części zakresu (ok. 3/5 całego zakresu).



Źródło: RAAB, ISERMANN 1993

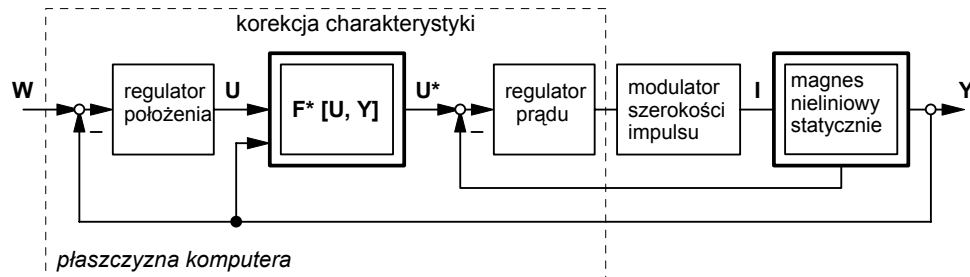
Rys. 4.8. Schemat prostego elektromagnesu skokowego. U – napięcie nastawcze o modulowanej szerokości impulsu; Y – droga; I – prąd cewki



Źródło: RAAB, ISERMANN 1993

Rys. 4.9. Zależna od drogi, nieliniowa charakterystyka siła-prąd prostego elektromagnesu i liniowa charakterystyka sprężyny

Z tego prostego elektromagnesu można jednak zbudować pozycjoner, który będzie wykonywać bardzo szybkie i równocześnie bardzo precyzyjne ruchy nastawcze. Osiąga się to za pomocą regulacji przedstawionej na rys. 4.10. Punktem wyjścia jest tu korekcja charakterystyki F^* , wbudowana w mikrokomputer w postaci oprogramowania. Z nieliniowej charakterystyki (rys. 4.9) wytwarza ona pożądane proporcjonalne zachowanie się magnesu. Proces ten, linearyzowany na zaciskach U - Y , ma więc stabilny przebieg w całym zakresie nastawczym. W przypadku konwencjonalnej regulacji położeniowej PID jakość regulacji jest jednak niezadowalająca, szczególnie w zakresie małego sygnału. Jest to wpływ histerezy. Podczas dodatkowej kompensacji tarcia osiąga się szybkie ruchy nastawcze z dokładnością pozycjonowania od ± 20 do $40 \mu\text{m}$ (0,1 do 0,2% zakresu nastawczego).



Źródło: RAAB, ISERMANN 1993

Rys. 4.10. Podstawowa struktura cyfrowej regulacji położenia prostego elektromagnesu nieliniowego

Ale to nie wszystko. Można jeszcze rozpoznawać uszkodzenia i stawiać diagnozę. Odbywa się to za pomocą metody szacowania parametrów. Na podstawie pomierzonych sygnałów wejściowych i wyjściowych U lub YW i w powiązaniu z określonym teoretycznie modelem procesu, jaki zachodzi w elektromagnesie, można wtedy określić nieznanne parametry elektromagnesu. Z przeliczenia i porównania współczynników procesu w stanie normalnym i odpowiadających im współczynników w różnych stanach uszkodzenia można wnioskować o stanie uszkodzenia. Dla każdego stanu uszkodzenia istnieją charakterystyczne kombinacje, wynikające z odchylenia od stanu normalnego. Kombinacje te, porównywane z wzorcem, pozwalają wnioskować zarówno o typie uszkodzenia jak i jego miejscu. Sposób ten nadaje się więc szczególnie do kontroli jakości obiektu podczas wytwarzania i obsługi w warsztacie. Dokładniejszy opis sposobu rozpoznawania uszkodzeń i stawiania diagnozy, opartego na modelu, można znaleźć np. w [RAAB, ISERMANN 1993].

Przykładem zastosowania opisanego wyżej aktora elektromagnetycznego może być urządzenie do nastawiania wydatku pompy wtryskowej silnika spalinowego. Chodzi tu o konstrukcyjnie zoptymalizowany produkt seryjny, stosowany w silnikach samochodowych. Taki napęd elektromagnetyczny nadaje listwie pompy ruch ciągły w zakresie $Y = 0$ do 20 mm. Proporcjonalna zależność między prądem cewki i siłą elektromagnesu jest osiągana przez szczególną geometrię tego ostatniego. Podobnie jak w magnesie z korygowaną charakterystyką istnieje tu także zależna od położenia charakterystyka histerezowa, utrudniająca szybkie i dokładne pozycjonowanie. Cyfrowy regulator położenia, w powiązaniu z właściwą kompensacją tarcia, daje w zakresie małych sygnałów lepszą charakterystykę niż wbudowany regulator analogowy.

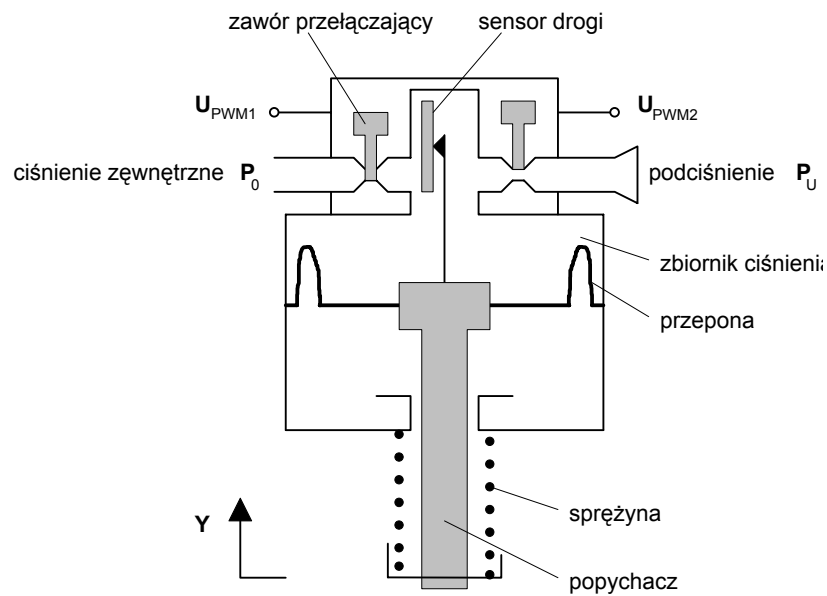
4.6 Aktory pneumatyczne

Aktory pneumatyczne są stosowane szczególnie tam, gdzie zadania nastawcze wykonywane są w ekstremalnych warunkach otoczenia, takich jak wysoka temperatura, silne zabrudzenie czy silne drgania. Dobrą koncepcją dla małych zakresów nastawczych jest napęd membranowy. Jest on prosty i zwarty.

Taki podciśnieniowy napęd membranowy (przeponowy), o zakresie nastawczym 20 mm, stosowany jest do uruchamiania przepustnicy w silnikach samochodów osobowych (rys.4.11). Może on pracować bez energii pomocniczej, ponieważ wykorzystuje siłę ssania (podciśnienie) w rurze ssącej silnika. Innymi obszarami jego zastosowania są zadania nastawcze podczas regulacji ciśnienia doładowania czy odprowadzania spalin, gdzie również istnieją ciśnienia zmienne w czasie, które mogą odkształcać membranę.

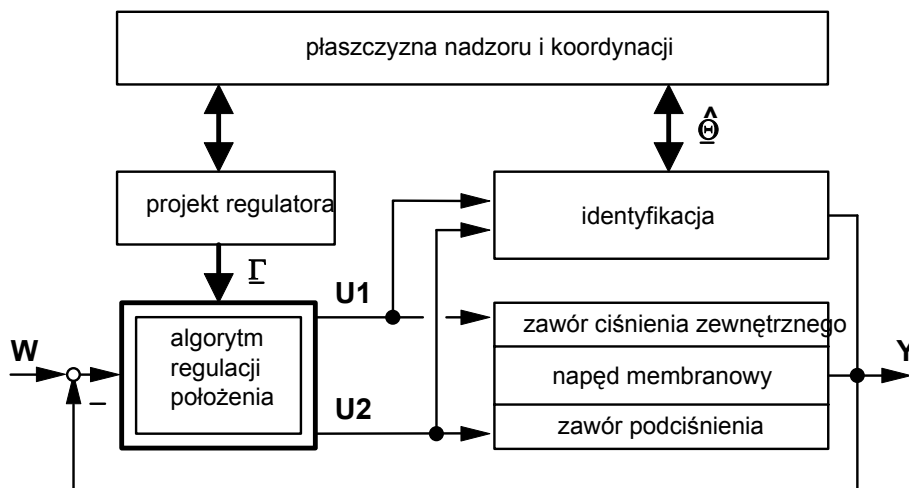
Problemem są tu silne zmiany parametrów regulowanego obiektu podczas normalnej pracy. Charakterystyka nastawcza zależy od kierunku przepływu. Podciśnienia i wynikające stąd obciążenia mogą wahać się w szerokich zakresach. Dlatego w nastawieniu regulatora uwzględniane są zmiany dynamiki obiektu o kilka rzędów.

Zastosowanie konwencjonalnej regulacji położenia pokazuje, że za pomocą tzw. odpornych (robust) i stałych algorytmów regulacji zrealizować można, dla wszystkich przypadków pracy, co najwyżej zadowalającą charakterystykę nastawczą. Dlatego opracowano koncepcję regulacji z parametrami adaptującymi się (rys. 4.12). Ujmuje ona nazwane wyżej właściwości i umożliwia dopasowanie parametrów regulatora do zmienionej charakterystyki obiektu.



Źródło: ISERMANN, RAAB 1993

Rys. 4.11. Schemat podciśnieniowego, pneumatycznego napędu przeponowego



Źródło: RAAB, ISERMANN 1993

Rys. 4.12. Podstawowa struktura regulacji położenia z adaptacją parametrów ($\hat{\Theta}$ – szacowane parametry obiektu regulacji; $\bar{\Gamma}$ – parametry regulatora)

Rozbudowane algorytmy regulacji nie wymagają rozbudowanego oprzyrządowania (hardware'u). Dotychczasowe zastosowania pokazują, że już mikrosterowniki o względnie małej mocy obliczeniowej nadają się do obróbki algorytmów regulacji i nadzoru. Warunkiem jest taka definicja przedstawień liczbowych, która zapewnia jeszcze wystarczającą dokładność przedstawienia i operowania w sensie specyfikacji. Na przykład mikrosterownik 80515 umożliwia, w zależności od wykorzystanego przedstawienia liczb, stosowanie częstości próbkowania w zakresie od 200 do 800 Hz. Jest to wartość, która wystarcza dla napędów nastawczych o częstotliwości granicznej do 40 Hz.

4.7 Podsumowanie

Aktory są elektronicznie sterowanymi członami wykonawczymi. Ich właściwości istotnie wpływają na wydajność i gotowość całego urządzenia mechatronicznego. Oprócz dobrej dynamiki (wykonywania szybkich i dokładnie pozycjonujących ruchów nastawczych) aktory spełniają funkcje systemowe: stają się zwartymi jednostkami funkcjonalnymi, które można łatwo dopasowywać do zmieniających się zadań. Ponadto nowoczesne aktory ułatwiają nadzór i diagnozę, zarówno siebie samego jak i całego urządzenia mechatronicznego.

5. Napęd mechatroniczny

Typowe silniki elektryczne z reguły nie nadają się do bezpośredniego napędu organów roboczych maszyn i urządzeń. Te ostatnie wymagają, ogólnie biorąc, małych prędkości i dużych momentów obrotowych. Typowe silniki elektryczne charakteryzują się czymś nam zupełnie przeciwnym – dużymi prędkościami i małymi momentami obrotowymi. Istnieją wprawdzie silniki elektryczne wolnoobrotowe, ale są one bardzo materiałochłonne, ciężkie i zajmują dużo miejsca. Racjonalnym rozwiązaniem jest więc połączenie wysokoobrotowego silnika elektrycznego z przekładnią, która redukuje kilkadziesiąt, a nawet kilkaset razy, prędkość kątową silnika i jednocześnie o tyle samo razy zwiększa jego moment obrotowy. Rozwiązania takie są znane od dawna i noszą nazwę motoreduktorów. Funkcje typowych motoreduktorów są jednak zbyt ubogie (tylko zwiększanie momentu i zmniejszanie prędkości), aby można je było stosować jako nowoczesne elektromechaniczne urządzenia wykonawcze (nastawcze) w automatyce, czyli aktry. Aktry zaś, jak wiemy z poprzedniego rozdziału, są dziś niezbędnym warunkiem szerokiej automatyzacji najróżnorodniejszych procesów mechanicznych.

Co należy zrobić, aby motoreduktor mógł spełniać funkcje aktora? Poniżej spróbujemy odpowiedzieć na to pytanie. Zaczniemy od ogólnej koncepcji napędu mechatronicznego. Następnie omówimy koncepcję motoreduktora mechatronicznego oraz przykład jej realizacji w postaci napędu przegubu robota. Przedstawimy przykład sprzęgła mechatronicznego. Na koniec pokażemy jak synchronizacja ruchów w różnych zespołach maszyny, zapewniana dotychczas przez sztywne mechaniczne połączenie wałów napędowych tych zespołów, może zostać zastąpiona synchronizacją elektroniczną i jakie wynikają z tego korzyści.

5.1 Koncepcja ogólna

Napęd mechatroniczny składa się zwykle z silnika elektrycznego, reduktora o dużym przełożeniu ($\gg 10:1$), elektroniki cyfrowej i elektroniki mocy. Do tego dochodzi oprogramowanie komputerowe. Obejmuje ono pliki do opisu dynamicznego zachowania się regulatora, elektroniki mocy i mechaniki reduktora. Do elementów systemu można zaliczyć także narzędzia oprogramowania, czyli różne programy do projektowania i realizacji regulatora, za których pomocą można dopasowywać strukturę kompensacji do całego systemu.

Reduktory o wysokim przełożeniu mają także cechy niepożądane – luz, tarcie, podatność, błędy kinematyczne. Cechy te, zależnie od rodzaju reduktora, występują w mniejszym lub większym stopniu. W reduktorach falowych (Harmonic Drive)

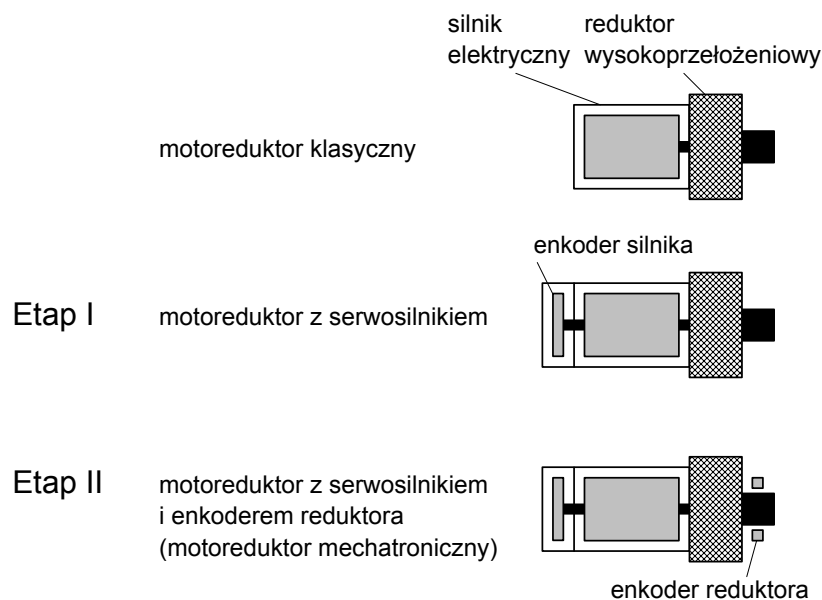
nie występuje np. luz, ale za to mają one wysokie tarcie i dużą podatność skrętną. Podobnie jest z innymi reduktorami bezluzowymi (napiętymi wstępnie). W przypadku reduktorów ciernych jest podobnie, choć tu dochodzi problem niestałości przełożenia (poślizg zależy od momentu obciążenia). Mamy do czynienia z systemem, który może być modelowany przez dwumasowy układ drgający z nieliniowościami. Jeżeli wał wyjściowy reduktora ma prowadzić organ po torze o dokładnej kinematyce, to konieczny jest regulator, który te wady skompensuje. W tym celu pożądanym jest ciągły pomiar kąтового położenia wału wyjściowego reduktora.

Istniejące w reduktorze tarcie suche i wiskotyczne może być kompensowane na podstawie obserwacji zakłóceń. Dla tak zlinearyzowanego obiektu regulacji (reduktora) wymagane jest wtedy sprzężenie zwrotne wielkości wyjściowych. Prędkości kątowe wałów, wejściowego i wyjściowego, oraz ich położenia kątowe mogą być uwzględniane w postaci stałych wzmocnienia sprzężenia zwrotnego. Prędkości te uzyskiwane są przez różniczkowanie dróg. Określenie wzmocnień sprzężenia zwrotnego i parametrów obserwatora następuje za pomocą programu, którego jądrem jest sposób optymalizacji wektora.

5.2 Motoreduktor jako aktor

Aby klasyczny motoreduktor mógł spełniać funkcje aktora, musi nie tylko zmniejszać liczbę obrotów czy zwiększać moment na wale wyjściowym, ale także przynajmniej zatrzymywać (ustawiać) ten wał w żądanym, dokładnym położeniu. W tym celu motoreduktor musi zostać wyposażony w automatykę, czyli sam stać się obiektem automatyzacji (rys. 5.1). Pierwszy etap automatyzacji (mechatronizacji) motoreduktora polega na dodaniu enkodera (czujnika położenia wału silnika) oraz sterownika mikroprocesorowego wraz z algorytmami sterowania. Silnik elektryczny z enkoderem nazywany jest zwykle serwo silnikiem. W ten sposób motoreduktor staje się serwo silnikiem z reduktorem.

Drugi etap mechatronizacji motoreduktora polega na dodaniu jeszcze jednego enkodera, tym razem na wyjściu reduktora. Za pomocą odpowiednich algorytmów sterowania można wtedy kompensować niepożądane zjawiska w reduktorze, takie jak luz, tarcie, podatność itp., co w przypadku jednego enkodera nie jest możliwe. Oznacza to także, że sprzężenie zwrotne może mieć charakter elastyczny, a nie sztywny, jak w klasycznych serwomechanizmach.



Rys. 5.1. Etapy automatyzacji (mechatronizacji) motoreduktora

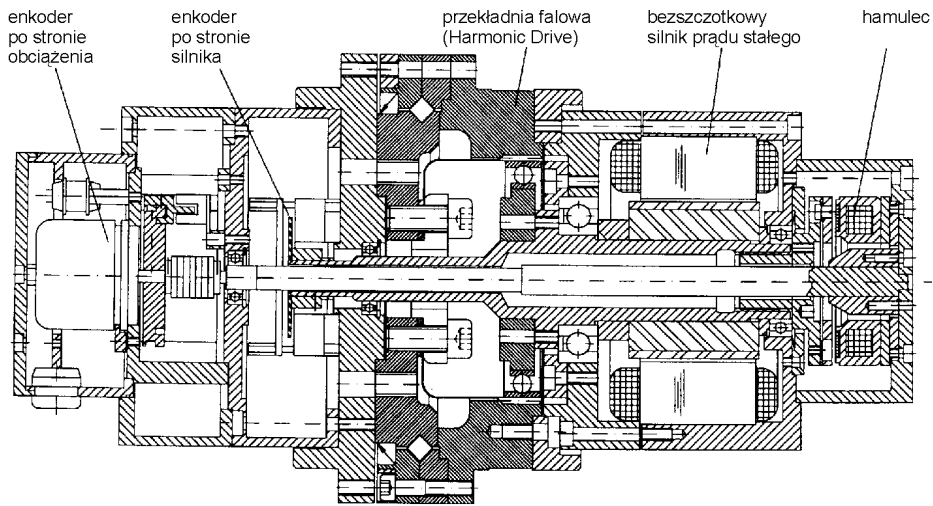
5.3 Motoreduktor mechatroniczny jako przegub robota

Przykładem realizacji motoreduktora mechatronicznego może być przegub robota, opracowany przez Laboratorium Mechatroniczne Uniwersytetu w Paderborn [MLaP] (rys. 5.2).

5.3.1 Budowa i właściwości

Motoreduktor mechatroniczny zawiera następujące elementy:

- reduktor wysokoprzełożeniowy (przełożenie $\gg 10:1$),
- silnik elektryczny,
- czujniki kąтового położenia wału (enkodery) – jeden na wejściu i jeden na wyjściu reduktora,
- hamulec magnetyczny,
- wyłącznik położenia krańcowego.



Źródło: MLaP 1993

Rys. 5.2. Przekrój motoreduktora mechatronicznego

Źródłem napędu jest serwsilnik bezszczotkowy. Wysoki moment napędowy, przy równocześnie niewielkim momencie bezwładności, sprzyja uzyskiwaniu dużych przyspieszeń przez wał wyjściowy przegubu. Pomiar kąta po stronie napędzanej wymagał wydrążonego wału silnika w celu przeprowadzenia osi przelotowej, przechodzącej przez całą przekładnię. Dopiero zastosowanie silnika bez obudowy umożliwiło takie ukształtowanie konstrukcji otaczających.

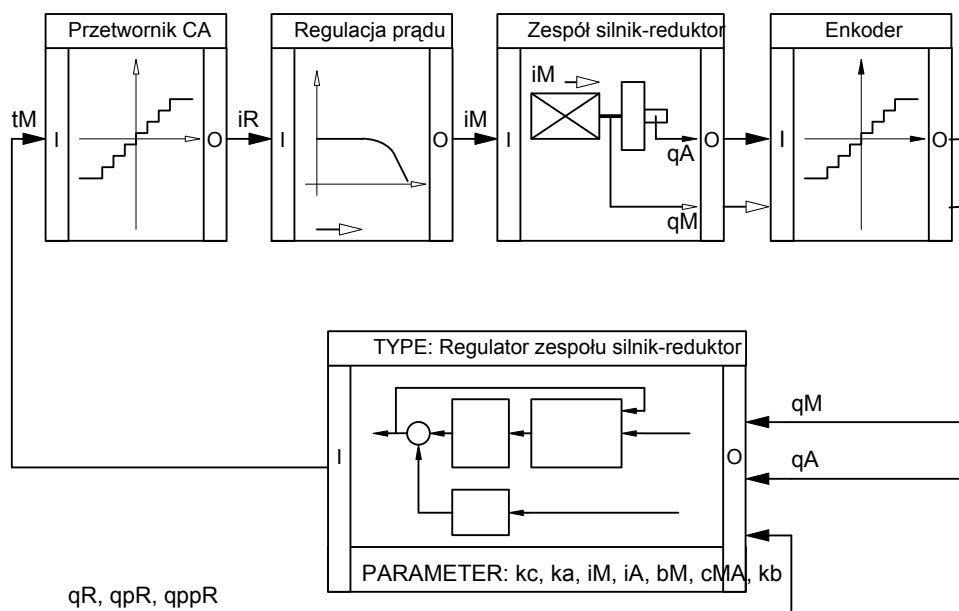
Motoreduktor ma dwa enkodery. Można więc mierzyć odkształcenia skrętne przekładni i kompensować je za pomocą odpowiedniej regulacji. W ten sposób możliwe jest dokładne pozycjonowanie wału wyjściowego przekładni. Rozdzielczość czujnika na wyjściu przekładni odpowiada przesunięciu o 1/100 mm na ramieniu długości 1000 mm.

Motoreduktor charakteryzuje się dobrą dynamiką i dokładnością pozycjonowania. Hamulec magnetyczny działa od strony silnika i wytwarza w stanie spoczynku moment równy momentowi znamionowemu silnika. Zintegrowany zderzak krańcowy może być wykorzystany do wyłączenia motoreduktora podczas awarii.

Dzięki dużej gęstości integracji elementów, dużej rozdzielczości czujników i dużej dynamice motoreduktor nadaje się do różnorodnych zadań napędowych o wysokich wymaganiach. Może być stosowany w systemach manipulacji (robotyka) czy obrabiarkach o dużych wymaganiach dokładności pozycjonowania i szybkości.

5.3.2 Budowa obwodu regulacji

Motoreduktor regulowany jest w sposób zdecentralizowany, oparty na obserwatorze. Zaproponowana struktura regulacji nadaje się szczególnie do napędów, w których silnik elektryczny, przez reduktor wysokoprzełożeniowy, napędza masę na wyjściu. Reduktory takie mają zwykle znaczną podatność skrętną i duże tarcie. Niedogodności te mogą być kompensowane przez odpowiednią regulację.



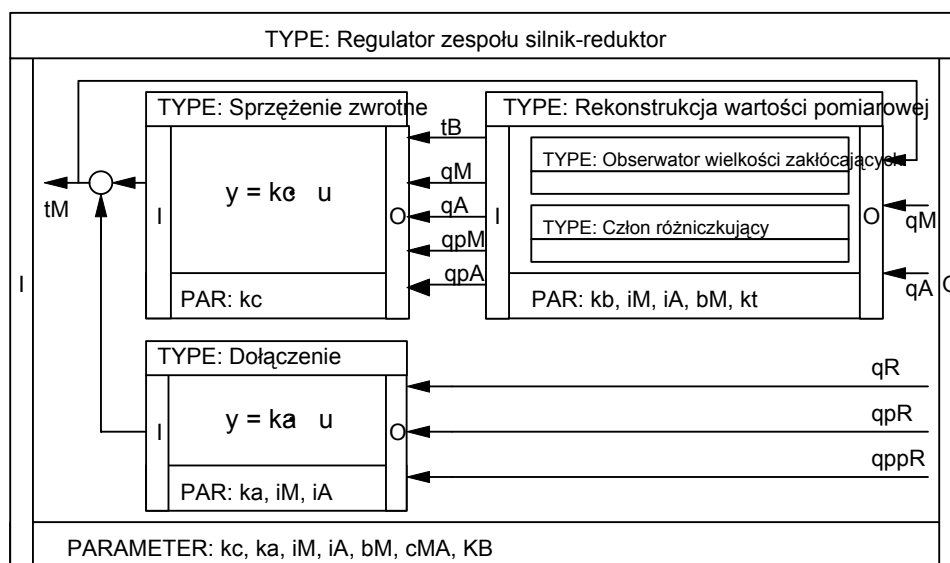
Źródło: MLaP 1993

Rys. 5.3. Schemat blokowy mechatronicznego zespołu silnik elektryczny-reduktor prędkości

Rysunek 5.3 pokazuje schemat blokowy całego układu. Widać tu wyraźnie dławcego motoreduktor ten możemy nazywać mechatronicznym. Obok elementów mechanicznych i elektronicznych (górny obszar rysunku) zawiera on bowiem odpowiednio dopasowane przetwarzanie informacji w postaci regulacji (dolny obszar). Blok regulacji prądu zawiera elektroniczną komutację bezszczotkowych silników prądu stałego, wzmacniacz mocy i analogową regulację prądu. Regulacja taka zapewnia to, że w pasmie przenoszenia do około 500 Hz prąd wirnika silnika i_M równy jest prądowi odniesienia i_R i przez to proporcjonalny do momentu silnika t_M .

5.3.3 Struktura regulacji

Blok przedstawiony jest dokładniej na rys. 5.4. Jest to liniowy system dynamiczny z wejściami pomiarowymi (kąt wału silnika q_M , kąt wału wyjściowego reduktora q_A) i wejściami zadawanymi (kąt odniesieniowy q_R , prędkość kątową odniesieniową qp_R , przyspieszenie katowe odniesieniowe qpp_R).



Źródło: MLaP 1993

Rys. 5.4. Struktura regulacji zespołu silnik-przekładnia

Pojęcia TYPE, INPUT, OUTPUT, PARAMETER, przedstawione na rysunkach, są słowami kluczowymi języka opisu systemu DSL (**D**ynamik **S**ystem **L**anguage), w których w prosty sposób opisywane są systemy regulacji i ich sprzężenie. Liniowy, stały udział regulacji obejmuje trzy elementy: rekonstrukcję wielkości pomiarowych, sprzężenie i dołączenie.

W bloku „regulator zespołu silnik-reduktor”, w zależności od możliwości wykonania pomiarów podstawowych wielkości obiektu regulowanego, następuje rekonstrukcja dodatkowych wielkości sprzężenia. Do określenia prędkości stosowane są rzeczywiste układy różniczkujące. Dlatego przy istniejących pomiarach kąta można zrezygnować z tachometru. W celu określenia zakłóceń, takich jak np. tarcie, stosowany jest obserwator zakłóceń 3. rzędu. Do pomyslenia jest także obser-

wator 5. rzędu, przy którym można czasami zrezygnować z układu różniczkującego. W układach podatnych na drgania i układach ze zmienną bezwładnością wyjściową dobór obserwatora nie jest jednak prosty.

Model obserwatora odpowiada ciału sztywnemu o bezwładności równej sumie bezwładności silnika i bezwładności obciążenia. Model ten jest rozszerzony o całkujący model zakłócenia. W ten sposób może być określana i kompensowana wielkość tarcia silnika. Wpływ zmiennej bezwładności na wale wyjściowym reduktora jest przez to zmniejszany a w przypadku robotów wzajemnie kompensowane są siły sprzężeń między osiami.

Wielkości pomiarowe i wielkości rekonstruowane są mnożone przez parametry regulacji i dodawane do udziału zwrotnego wielkości nastawczej. Przez sprzężenie zwrotne prędkości silnika i wału wyjściowego reduktora drgania reduktora są aktywnie tłumione.

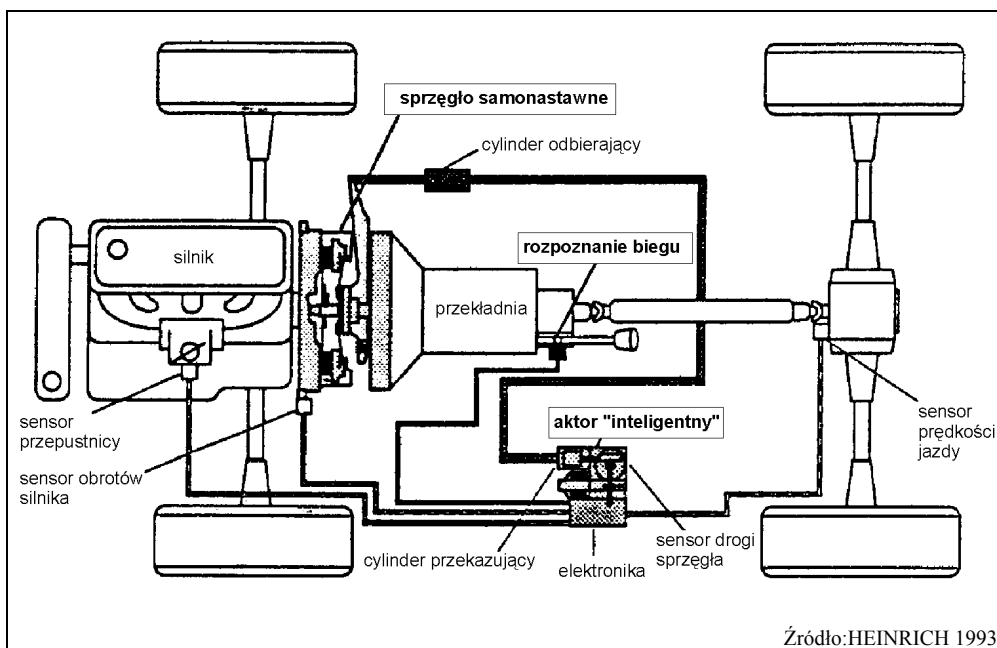
Wzmocnienia dołączenia ka_i są funkcją wzmocnień sprzężeń zwrotnych kc_i i parametrów obiektu regulacji. Parametry obiektu, które się zmieniają, jak np. tłumienie silnika czy bezwładność wyjściowa, wpływają silnie na dobroć regulacji, o ile nie są śledzone. Dzięki obserwatorowi zakłóceń dołączenie prędkości staje się niezależne od parametrów obiektu. Zależy ono tylko od parametrów obserwatora i regulatora, które są przecież znane i niezmiennie. W ten sposób możliwe staje się wykonanie dokładnych trajektorii, pomimo tarcia i zmiennego tłumienia. Podczas dołączenia przyspieszenia wpływ parametrów obiektu regulacji jest co najmniej zmniejszany. Jeżeli w bloku sprzężenia zwrotnego zrezygnujemy ze sprzężenia silnika, to wzmocnienie dołączenia jest zależne tylko od stałych parametrów regulatora i obserwatora.

5.4 Sprzęgło mechatroniczne

Samochodowe sprzęgła automatyczne oferowane były już w latach sześćdziesiątych. Ich funkcjonowanie nie było jednak zadowalające. Problemy z obsługą i podatność na uszkodzenia rozwiązała dopiero nowoczesna elektronika. Doprowadziło to do rozwoju konstrukcji sprzęgieł samonastawnych, kompensujących zużycie okładzin.

Podstawowa różnica w stosunku do sprzęgła konwencjonalnego polega na tym, że łożyskowanie sprężyny talerzowej (głównej) nie jest przymocowane do pokrywy, lecz oparte na tzw. sensorowej sprężynie talerzowej [HEINRICH 1993]. Gdy siła wyłączenia rośnie wskutek zużycia okładzin, sensorowa sprężyna talerzowa wędruje w kierunku koła zamachowego silnika tak długo, aż siła wyłączenia znowu spadnie do wartości siły sprężyny sensorowej. Powstająca przy tym szczelina za-

mykana jest przez pierścień z tworzywa sztucznego poruszany przez sprężyny. Rysunek 5.5 przedstawia istotę sterowania takim sprzęgłem. Sprzęgło wymaga minimalnych sił operowania. Nie wymaga dodatkowej sensoryki, oprócz tej, która istnieje już w nowoczesnych pojazdach. Inną zaletą jest większa rezerwa na zużycie.



Rys. 5.5. Elektroniczne sterowanie sprzęgłem samonastawnym

5.5 Elektroniczna synchronizacja ruchów zamiast sztywnego powiązania mechanicznego

Napędy centralne jeszcze dziś często stosuje się w wielu maszynach. Przykładem mogą być rotacyjne maszyny drukarskie, stosowane w przemyśle poligraficznym i włókienniczym. Przez długie wały, przekładnie redukcyjne, przekładnie rozdzielcze i pasy zębate moment napędowy jest przekazywany i rozdzielany na zespoły drukujące, farbujące, na walce wciągające i inne agregaty. Synchronizacja pracy tych zespołów z materiałem drukowanym zapewniona jest przez sztywne mechaniczne połączenie wałów napędowych.

5.5.1 Dlaczego synchronizacja elektroniczna zamiast mechanicznej?

Sposoby produkcji w zakładach przemysłowych zmieniają się dziś radykalnie. Maleją partie produkcyjne. Zmiany produktu są coraz częstsze. Z tego powodu coraz większego znaczenia nabierają nieprodukcyjne okresy maszyny. Czas postoju na przygotowanie np. maszyny drukarskiej do druku kolejnego produktu, na przebrojenie urządzeń mechanicznych na nowy format czy nowe prowadzenie drukowanego materiału, powinien być jak najkrótszy. Z pomocą przychodzi elektronika. Maszyny drukarskie, wyposażone w zdecentralizowane, cyfrowe napędy pojedyncze (napędy mechatroniczne), wychodzą naprzeciw życzeniom wydawnictw i drukarni o jednej elastycznej, zautomatyzowanej maszynie produkcyjnej. Drukarnia, posiadająca taką maszynę, może przygotowywać produkcję nowego produktu wtedy, gdy maszyna drukuje jeszcze stary produkt. Dokładna synchronizacja miejsc drukowania na bieżącej taśmie daje dalszy zysk na czasie. Tak spełnia się marzenie o zmianie produkcji „w locie”. A oto szczegóły najważniejszych korzyści [PETERS 1995]:

- Cyfrowe napędy pojedyncze mogą być wiązane w dowolne strumienie napędowe. Odbywa się to za pomocą elektronicznej regulacji synchronicznej. Dowolnie konfigurowalne oprogramowanie zastępuje sztywne powiązania ruchów w maszynie klasycznej. Dla każdej fazy i każdej chwili operacji system automatyzacji kontroluje liczbę obrotów i położenie każdego wału napędowego w maszynie i optymalizuje te wielkości nastawcze dla procesu. Oddzielne (podporządkowane) regulacje, dotyczące np. cięcia czy naprężenia materiału, mogą być bezpośrednio wprowadzane do elektronicznej synchronicznej regulacji napędu.
- Napędy pojedyncze redukują liczbę i długość wałów. Stąd mniejsza liczba połączonych z nimi przekładni i sprzęgieł. Zbędne stają się wszystkie mechaniczne urządzenia rozgałęziające, nawrotne i przestawcze; napędy pomocnicze i boczne. Podczas zmiany asortymentu, konserwacji czy naprawy, napędy pojedyncze pozwalają dowolnie manewrować zespołami całej maszyny.
- Napędy pojedyncze usuwają wiele źródeł niedokładności układów mechanicznych. Chodzi tu przede wszystkim o odkształcenia wałów (skręcenie zależne od obciążenia), drgania skrętne, luzy w przekładniach i tolerancje wykonania. Złożony strumień napędowy, ze swoimi właściwościami wielomasowego układu drgającego, jest rozkładany na przejrzyste elementy. Obciążenie napędu pojedynczego wpływa na inne napędy tylko przez przerabiany materiał (np. naprężoną taśmę papieru czy tkaniny). Synchronizacja elektroniczna pracuje całkowicie bez oddziaływania zwrotnego, co ma miejsce w przypadku synchronizacji mechanicznej, wymuszonej przez sztywne połączenie wałów. Taka „bezwalowa” maszyna pozwa-

ła się łatwiej dzielić na jednostki i wytwarzać w postaci modułów funkcjonalnych. Istniejące maszyny mogą być więc bez ryzyka rozszerzane o dalsze jednostki robocze.

Zastąpienie synchronizacji mechanicznej elektroniczną nie jest jednak łatwe. Na przeszkodzie stają wysokie wymagania nowoczesnych, szybkobieżnych maszyn produkcyjnych. I tak np. w maszynie drukarskiej, drukującej z prędkością 600 m/min, „cel” pojedynczo napędzanego i regulowanego zespołu drukarskiego na taśmie papierowej porusza się z prędkością 10 m/s, czyli 10 $\mu\text{m}/\mu\text{s}$. Aby zachować tolerancję 20 μm dla obrazów drukowanych przez dwa cylindry, leżące jeden za drugim, wartości nastawione i wartości pomierzone pozycjonowania napędów muszą być w zakresie mikrosekundowym równocześnie odczytywane i przerabiane w obwodach regulacji. Wymagana jest więc bardzo duża prędkość obliczania i synchronizacja układów regulacji. Wymagania te można spełnić tylko za pomocą napędów najnowszych generacji.

5.5.2 Przykład

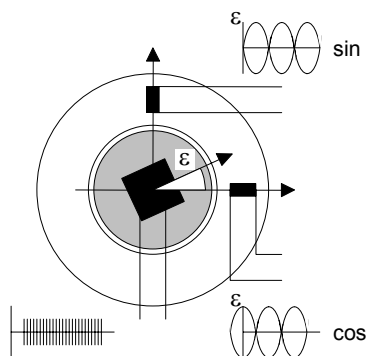
Przykładem napędu mechatronicznego o powyższych właściwościach może być np. napęd SDS 100 firmy ABB Industrietechnik AG [PETERS 1995]. Jest on wyposażony w regulację prędkości i dodatkowo regulację położenia. Do synchronicznej wymiany danych służą znormalizowane interfejsy. Napędy takie pozwalają bezpośrednio nadzorować wszystkie wielkości, za których pomocą silnik może wpływać na proces. Za pomocą tylko jednego sensora w silniku uzyskiwane są wszystkie wielkości stanu w interfejsie maszyny:

- moment obrotowy, obliczany z prądu silnika za pomocą modelu maszyny;
- liczba obrotów i kąt obrotu wału silnika, mierzone za pomocą dokładnego optycznego czujnika inkrementalnego, który jest zamontowany sztywno na wale silnika (bez dodatkowego sprzęgła).

Nowy sposób obróbki sygnału w przekształtnikach prądu stałego w prąd przemienny (falownikach) przesuwa rozdzielczość pomiaru pozycji daleko poza wcześniej osiąganą granicę. Sygnały użytkowe mają, podobnie jak w resolwerze elektromechanicznym, przebieg sinusowy i kosinusowy, zależnie od kąta obrotu. Miarą ich okresu nie jest jednak całkowity obrót wału silnika, jak w klasycznym już resolwerze, ale bardzo mały, dokładny przyrost kąta. Układ elektroniczny zlicza wydane przyrosty (okresy) śladów czujnika, co jest typowe dla techniki czujników przyrostu kąta. Oprócz tego układ ten interpoluje wiele tysięcy pośrednich wartości kąta obrotu. Czyni to przez obliczanie arcustangensa z odczytywanych wartości chwilowych sygnałów sinusowych i kosinusowych (rys. 5.6). Wartość nastawcza liczby obrotów otrzymywana jest po wewnętrznym przeliczeniu sekwencji warto-

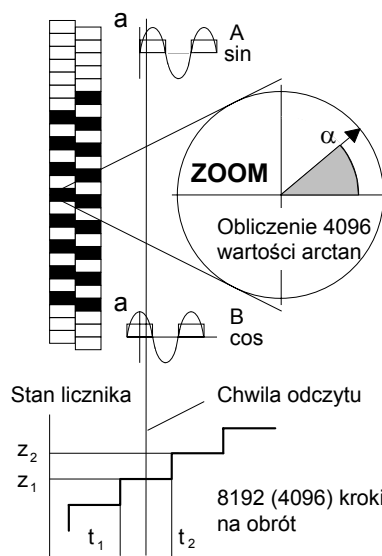
ści kolejno po sobie zmierzonych pozycji wirnika. Najmniejsze liczby obrotów, około jeden obrót na dzień, mogą w ten sposób być podawane z dokładnością układu cyfrowego i utrzymywane z dużą stałością. W ten sposób jeden system sensoryczny zamyka oba obwody regulacji: kąta obrotu i liczby obrotów. Ponieważ wszystkie operacje obliczeniowe do pomiarów i regulacji wykonywane są 4 000 razy na sekundę, napędy te łączą dynamiczną prędkość reakcji regulacji analogowej z dokładnością systemu cyfrowego.

Resolver



Rozdzielczość:
zwykle 1024 informacje na obrót

Czujnik optyczny o wysokiej rozdzielczości



około 32 000 000 (16 000 000) informacji

Źródło: PETERS 1995

Rys. 5.6. Porównanie rozdzielczości resolvera i czujnika optycznego o wysokiej rozdzielczości

5.6 Podsumowanie

Napęd mechatroniczny składa się zwykle z silnika elektrycznego, reduktora o dużym przełożeniu ($\gg 10:1$), elektroniki cyfrowej, elektroniki mocy oraz z oprogramowania komputerowego. To ostatnie obejmuje pliki do opisu dynamicznego zachowania się regulatora, elektroniki mocy i mechaniki reduktora. Synchronizacja ruchów w różnych zespołach maszyny, zapewniana dotychczas przez sztywne mechaniczne połączenie wałów napędowych tych zespołów, może zostać zastąpiona synchronizacją elektroniczną. Korzyści z tego wynikające przedstawia tabela 5.1.

Tabela 5.1. Porównanie klasycznego napędu mechanicznego z napędem mechatronicznym

Klasyczny napęd mechaniczny	Napęd mechatroniczny
jeden długi wał transmisyjny, sztywno łączący napędy odgałęzieniowe	wiele pojedynczych napędów, synchronizowanych elektronicznie
przekładnia zębata, pas zębata	przekładnia elektroniczna
krzywka, przekładnia o ruchu nierównomiernym	„krzywka” elektroniczna, cykliczny tor ruchu, programowany jako funkcja matematyczna lub tabela punktowa drogi
sprzęgło włączalne	synchronizacja z poruszającym się celem
przekładnia z nakładającymi się ruchami	bieg synchroniczny z nakładającym się pozycjonowaniem

6. Projektowanie mechatroniczne

Rozwój automatyki i elektroniki doprowadził do podziału zadań podczas konstruowania maszyn. Dokumentacja wytwarzania nowoczesnej maszyny obejmuje nie tylko elementy mechaniczne, ale także elementy automatyki i oprogramowanie komputerowe. Mamy więc do czynienia z trzema różnymi dziedzinami techniki: (1) mechaniką i budową maszyn, (2) automatyką i (3) techniką komputerową. Dostateczne zgłębienie wszystkich trzech obszarów przez jednego człowieka okazuje się w praktyce bardzo trudne. Konieczna jest więc praca w zespole odpowiednich specjalistów (mechanik + automatyk + informatyk) i rozwijanie wspólnego języka (sposobu myślenia) ułatwiającego porozumienie. O tym, jak to jest ważne, można się przekonać z typowych sposobów myślenia i pracy różnych członków zespołu:

Mechanik myśli funkcjami elementów mechanicznych (elektromechanicznych); niezależnie od tego czy pracuje świadomie metodycznie (dyskursywnie), czy intuicyjnie. Funkcje całkowite rozkłada na funkcje częściowe, do których realizacji zaprzęga efekty fizyczne.

Automatyk, w przeciwieństwie do poprzednika, myśli schematami blokowymi i strumieniami sygnałów. Nie rozważa on efektów fizycznych, lecz części i zespoły dostępne na rynku, powiązania logiczne, dopasowanie do elektromechaniki, straty energii oraz odległości z punktu widzenia zakłóceń.

Informatyk myśli przebiegami czasowymi, powiązaniem logicznymi i zbiorami danych. Dla niego ważne są sekwencje rozkazów, pętle, rozgałęzienia i zależności.

Rodzą się więc pytania: Jak ci trzech różni projektanci mogą porozumiewać się ze sobą, nie wnikając w wiedzę specjalistyczną każdej z dziedzin? Czy każdy z nich powinien opanować wiedzę (przynajmniej podstawy) pozostałych dwu dziedzin? Czy istnieją wspólne elementy wszystkich trzech dziedzin, tworzące naturalną płaszczyznę porozumienia? Jeżeli tak, to jakie? Odpowiedzi na tak postawione pytania nie są łatwe i jednoznaczne. Jedno jest pewne: racjonalny proces projektowania i konstruowania urządzeń mechatronicznych wymaga innego podejścia (filozofii) niż proces projektowania i konstruowania konwencjonalnych urządzeń mechanicznych. U podstaw tej filozofii leży różnica między cechami urządzenia konwencjonalnego a cechami urządzenia mechatronicznego.

Mechatronika stawia projektowanie i konstruowanie maszyn przed nowym wyzwaniem. Sprostanie temu wyzwaniu nie jest łatwo. Projektowanie i konstruowanie są bowiem procesami bardzo złożonymi. Nie dają się opisać jako prosta sekwencja czynności lub algorytm komputerowy. Muszą uwzględniać wiele bardzo różnych punktów widzenia: planowanie, organizację, kreatywność, rozpisanie zadań itp.

Muszą uwzględniać trzy podstawowe poziomy całościowego podejścia do procesu projektowania i konstruowania: (1) *rozwiązywanie problemu*, (2) *syntezę produktu*, oraz (3) *wdrożenie i rozwój produktu*. Poziomy te mogą się bardzo różnić. Pierwszy z nich bowiem opiera się na *sposobie myślenia człowieka*, drugi na *charakterystykach systemów technicznych*, a trzeci na *organizacji zakładu produkcyjnego*.

Każde projektowanie wymaga odniesienia się do wszystkich trzech poziomów. W każdym z nich możemy stosować odpowiednią kolejność wykonywania czynności projektowych; dzielić je na etapy i fazy; stosować zalecane modele i metody. I to będzie właśnie opisane w tym rozdziale. Chcemy pokazać, że – na poziomie syntezy produktu – projektowanie urządzeń mechatronicznych istotnie różni się od klasycznego projektowania i konstruowania maszyn czy układów elektronicznych. Zaczniemy od charakterystycznych cech i zagadnień projektowania mechatronicznego. Zastanowimy się nad tym jak stawiać zadania systemom mechatronicznym. Omówimy podstawowe ich funkcje zewnętrzne i rolę mikroprocesora jako urządzenia przełączającego. Pokażemy, że płaszczyzną porozumiewania się specjalistów z różnych dziedzin może być właśnie struktura funkcjonalna projektowanego urządzenia mechatronicznego. Zajmiemy się modelami i metodami ustalania tej struktury; zdobywaniem informacji o procesie, którym urządzenie mechatroniczne ma sterować. Krótko wspomnimy o narzędziach projektowania, a na koniec przedstawimy przykład tworzenia struktury systemu mechatronicznego.

6.1 Charakterystyczne cechy i zagadnienia projektowania mechatronicznego

6.1.1 Zintegrowanie projektowania i konstruowania

Rozważmy cztery produkty, które możemy traktować dziś jako „oczywistą mechatronikę”: nowoczesny silnik spalinowy, drukarkę laserową, typowy robot oraz aparat fotograficzny z automatycznym nastawianiem ostrości (auto-focus). Określmy naturę podstawowych elementów tych produktów z punktu widzenia obszarów wiedzy, do których należą (rys. 6.1). Widać wyraźnie, że niektóre obszary są obecne we wszystkich czterech produktach. Obszary te – elektronika, mechanizmy, konstruowanie i sterowanie – można potraktować jako podstawowe obszary robocze projektowania i konstruowania mechatronicznego. Szczególna rola przypada tu konstruowaniu, rozumianemu jako metodyka czy *technika konstruowania*. Jest ono bowiem czynnikiem integrującym pozostałe obszary.

Natura elementów podstawowych \ Produkt mechatroniczny	Silnik spalinowy	Drukarka laserowa	Prosty robot	Aparat fotograficzny Auto-focus
Mechanizmy	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Struktura			<input type="radio"/>	
Sensory	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronika	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Optyka	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>
Konstruowanie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sterowanie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Oprogramowanie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Rys. 6.1. Mechanizmy, elektronika, sterowanie i konstruowanie jako podstawowe obszary robocze projektowania i konstruowania mechatronicznego

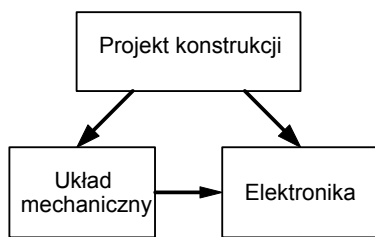
Mechatronika integruje nie tylko różne rodzaje urządzeń, ale także różne podejścia i sposoby ich projektowania. Z dotychczasowego rozwoju urządzeń mechatronicznych wynika, że integrować można różnie: przez (1) proste *składanie* istniejących elementów różnych, przez (2) *uzupełnianie* elementów niezbędnych, czy wreszcie przez (3) *tworzenie elementów różnych* w ramach jednej całości. Nie odbywa się to bezproblemowo. Porozumienie się specjalistów z różnych dziedzin nie zawsze jest łatwe. Przeszkadzają temu typowe podejścia do projektowania i konstruowania w tych dziedzinach. I tak:

- projektowanie i konstruowanie zespołów mechanicznych systemu dotyczy przede wszystkim *zależności przestrzennych* i stąd jest samo w sobie procesem *trójwymiarowym*;
- projektowanie i konstruowanie zespołów elektronicznych systemu dotyczy przede wszystkim *przetwarzania sygnału* i wzajemnego połączenia elementów dyskretnych i może być traktowane jako proces *dwuwymiarowy*;
- projektowanie i konstruowanie elementów towarzyszącego oprogramowania i inżynieria oprogramowania dotyczy przede wszystkim opracowania *algorytm-*

mów przetwarzających dane i dlatego – z fizycznego punktu widzenia – jest bezwymiarowe [BRADLEY, BUUR 1993].

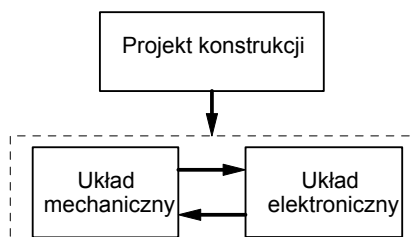
Zintegrowane urządzenia wymagają zintegrowanego projektowania konstruowania. Podczas projektowania i konstruowania systemów konwencjonalnych zarówno projekt jak i przestrzenne rozmieszczenie komponentów mechanicznych i elektronicznych są rozdzielone. Mechatroniczne podejście do projektowania i konstruowania charakteryzuje się tym, że system mechaniczny i elektroniczny od samego początku należy traktować jako zintegrowany przestrzennie i funkcjonalnie system całkowity (rys. 6.2). To, co łatwiej jest rozwiązać mechanicznie, rozwiązuje się środkami mechanicznymi, to zaś, co łatwiej jest rozwiązać elektronicznie – elektronicznymi i komputerowymi (por. rys. 2.9 i tab. 5.1). Układ elektroniczny ma wpływ na kształtowanie systemu mechanicznego już podczas projektowania.

Postępowanie konwencjonalne



oddzielne składniki

Postępowanie mechatroniczne

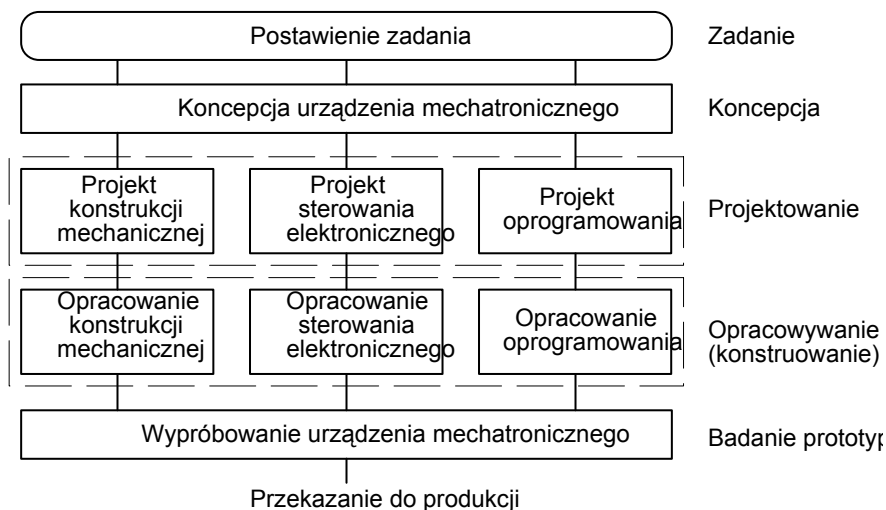


całociowy układ mechatroniczny

Źródło: ISERMANN 1993

Rys. 6.2. Różnica między konwencjonalnym a mechatronicznym podejściem do konstruowania

W systemach mechatronicznych zadanie rozwiązywane jest zarówno na drodze mechanicznej jak i cyfrowo-elektronicznej. Rysunek 6.3 pokazuje typowe fazy, przez jakie wielokrotnie przechodzi proces rozwoju produktu mechatronicznego. Fazy projektowania i opracowywania produktu dla trzech obszarów – konstrukcji mechanicznej, sterowania elektronicznego i oprogramowania – przebiegają raczej niezależnie. Sposoby rozważania i postępowania w każdej fazie istotnie od siebie odbiegają. Dopiero wyniki pracy zebrane razem dają kompletną dokumentację urządzenia.

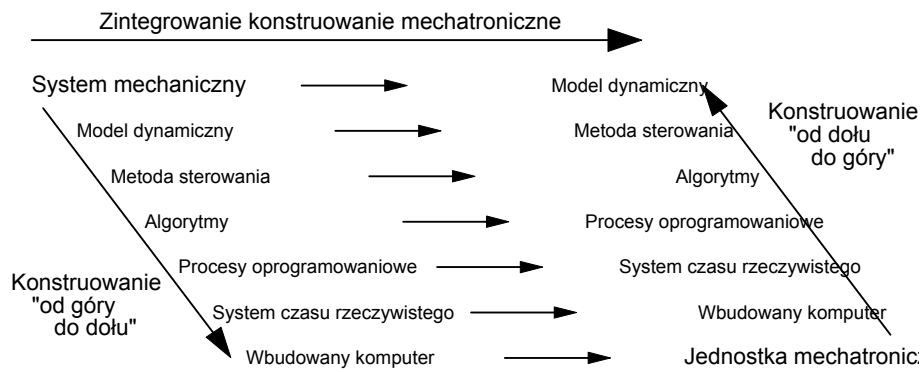


Rys. 6.3. Sposób postępowania w konstruowaniu urządzeń mechatronicznych

Warunkiem koordynacji tych trzech obszarów jest jednoznaczne określenie zadań częściowych. Powstaje to podczas ustalania koncepcji urządzenia przez wspólne działanie ekspertów z trzech obszarów: konstrukcji mechanicznych, sterowania elektronicznego i oprogramowania.

Podczas opracowywania urządzenia, od idei do dojrzałości seryjnej, przechodzi się wielokrotnie przez fazy pokazane na rys. 6.3. Wynikami pośrednimi poszczególnych etapów rozwoju są: model funkcjonalny, prototyp i seria zerowa. Z etapu na etap przesuwają się punkty ciężkości rozwoju. Punktem ciężkości do chwili opracowania modelu funkcjonalnego jest sprecyzowanie postawionego zadania i ustalenie koncepcji urządzenia.

Udane opracowanie mechatroniczne powinno zastąpić, uprościć lub poprawić elementy mechaniczne i/lub tworzyć nową funkcjonalność mechaniczną. Proces inżynierski zaczyna się od analizy wymaganej funkcjonalności mechanicznej i kończy się integracją wbudowanego systemu sterowania komputerowego z urządzeniem mechanicznym, (por. rys. 6.4).



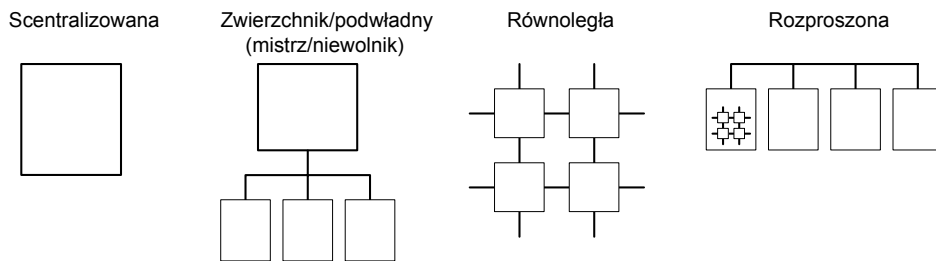
Źródło: WIKANDER 1994

Rys. 6. 4. Mniej lub bardziej zintegrowane etapy projektowania i konstruowania mechatronicznego

6.1.2 Modularność budowy

Systemy mechatroniczne stają się coraz bardziej złożone. Wielość nowych metod sterowania (adaptacyjne, neuronowe, rozmyte ...) powoduje, że bardzo ważne stają się pieczołowite przygotowanie procesu rozwojowego i wydajnych narzędzi. Kluczem do sukcesu w konstrukcji takich złożonych systemów mechatronicznych jest modularność (budowa z gotowych klocków, budowa modułowa). Chodzi tu o podejście oparte na modułach mechatronicznych. Moduły takie, obudowane i spełniające jasno określone funkcje, są integrowane w podsystemy i systemy. Stąd już blisko do rozważenia ogólnych architektur systemu, właściwych do zastosowań mechatronicznych (patrz rys. 6.5). Modularność i rozproszenie architektury są wyraźnymi celami w rozwoju mechatroniki. Rozproszenie w tym kontekście oznacza zarówno decentralizację funkcji sterowniczych jak i przestrzenne rozproszenie elementów sterowania.

Modularność ułatwia prace rozwojowe, takie jak konstruowanie, symulację czy testowanie. Moduły o pewnym stopniu autonomii, ale ze zdolnością do komunikowania się w czasie rzeczywistym, można opracowywać równocześnie (inżynieria równoległa). Przyspiesza to proces rozwoju i zapewnia konkurencyjność przez specjalizację. Modularność budowy urządzenia ułatwia utrzymywanie jego stanu technicznego. Rozproszona architektura ze swą wewnętrzną modularnością, jak pokazano na rys. 6.5, sprzyja elastyczności tworzenia dowolnej architektury sterowania.



Źródło: WIKANDER 1994

Rys. 6.5. Różne architektury systemu rozważane w zastosowaniach mechatronicznych

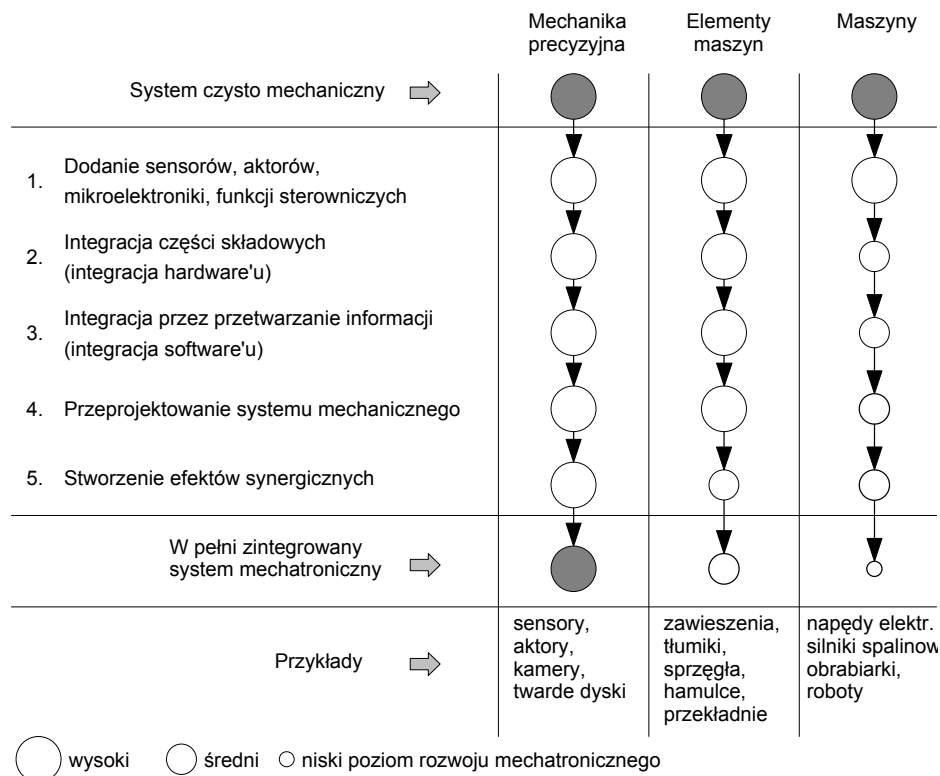
6.1.3 Kompensacja nieliniowości elementów mechanicznych za pomocą inżynierii sterowania

Jakość większości systemów mechatronicznych „cierpi” z powodu nieliniowych efektów wewnątrz typowych elementów maszyn: przekładni, łożysk, zaworów, elektromagnesów itp. Wiele z tych nieliniowości ma charakter nieciągły i nieanalityczny. Linearyzacja w takich przypadkach jest zwykle niemożliwa lub pozbawiona sensu. Konstruktorzy urządzeń mechatronicznych często skłaniają się ku skomplikowanej konstrukcji mechanicznej. Efektem są ciężkie i sztywne człony, wymaganie wysokiej precyzji wykonania połączeń, łożysk i przekładni. Problemy nieliniowości elementów mechanicznych mogą być obecnie coraz bardziej skutecznie rozwiązywane przez inżynierię sterowania, a nie przez skomplikowaną i drogą konstrukcję mechaniczną.

Uproszczona budowa i mniejsze zwracanie uwagi na uzyskanie liniowości charakterystyk na drodze czysto mechanicznej nie oznaczają wcale, że konstruktorzy-mechanicy nie powinni dążyć do prostych i jednoznacznych konstrukcji mechanicznych. Kompensacja negatywnych właściwości mechanicznych przez odpowiednio dobrane algorytmy regulacji jest przecież „leczeniem” skutków, a nie usuwaniem przyczyn. Dlatego mając na uwadze większą skuteczność leczenia przyczynowego, nie należy zaprzestawać prób likwidacji źródeł nieliniowości w elementach mechanicznych.

Tabela 6.1 pokazuje etapy konstruowania i stopnie rozwoju systemów mechatronicznych w tradycyjnych branżach przemysłu maszynowego. Widać z niej wyraźnie, że najbardziej zaawansowaną mechatronicznie branżą jest mechanika precyzyjna, co wydaje się poniekąd naturalne.

Tabela 6.1. Etapy konstruowania i stopnie rozwoju systemów mechatronicznych



Źródło: ISERMANN 1996

6.2 Stawianie zadań systemom mechatronicznym

Jak stawiać zadania systemom mechatronicznym? Czego te zadania powinny i mogą dotyczyć? Co można osiągnąć przez integrowanie układów mechanicznych z elektronicznymi? Czego wymagać od systemów mechatronicznych? Jak dochodzić do tych wymagań? ISERMANN [1993] radzi, aby najpierw zestawiać różne elementy mechaniczne i maszyny, których charakterystyki mogą być potencjalnie poprawione przez integrację mechaniki z elektroniką. Kolejnym etapem jest rozpatrzenie różnych rodzajów przetwarzania informacji i określenie wymagań, które ma spełniać system elektroniczny.

6.2.1 Układ mechaniczny

Przez integrowanie układów elektronicznych z mechanicznymi można osiągnąć, poprawę charakterystyk następujących typowych zespołów (elementów) maszyn:

- elementy sprężyste,
- tłumiki i amortyzatory drgań,
- sprzęgła, elastyczne lub cierne,
- łożyskowania, mechaniczne lub magnetyczne,
- przekładnie mechaniczne (zębate, łańcuchowe, pasowe, cierne).

Charakterystykami, które można poprawić, mogą być na przykład:

- sztywność i tłumienie (uzyskanie lub poprawa samonastawialności),
- luz lub napięcie wstępne (uzyskanie lub poprawa samonastawialności),
- automatycznie przebiegające funkcje częściowe (sprzęganie, przełączanie),
- funkcje nadzorowania.

Systemy elektroniczne umożliwiają wiele nowych lub usprawnionych funkcji, zarówno w maszynach energetycznych, roboczych jak i w pojazdach. Przykładami są:

- precyzyjne regulacje pozycji i liczby obrotów we wszystkich punktach roboczych,
- sterowanie i regulacja funkcji częściowych, praca w zakresach granicznych,
- samonastawialne tłumienia drgań czy niewyrównoważeń,
- nadzorowanie z diagnozą uszkodzeń,
- optymalizowanie sprawności czy obciążenia,
- uniemożliwianie blokowania, regulacja poślizgu,
- ogólne zarządzanie procesem.

W ostatnich latach próbowano – przez wbudowywanie sensorów, prostych sterowań i regulacji analogowych i cyfrowych, jak również aktorów – tak kształtować elementy i zespoły przetwarzające informacje tak, aby były one bardziej elastyczne, stosowalne w różnych przypadkach. Granicami stosowalności okazały się: (1) niedostatek odpowiednich sensorów i aktorów, (2) niewystarczającą ich żywotność w najczęściej ostrych warunkach otoczenia (temperatura, przyspieszenie, zabrudzenie), (3) duże zapotrzebowanie na przestrzeń i wymagane połączenia kablowe oraz (4) małą prędkość przetwarzania informacji. W zintegrowanych systemach mechaniczno-elektronicznych należy więc spróbować usunąć te wady i dojść do pewnej autonomii, autarkii (własne zasilanie, przekazywanie bezstykowe), tak aby z układów poruszających się lub hermetycznie zamkniętych możliwie nic nie mu-

siało wystawać. Ponadto wiele wielkości, na które mamy wpływać, nie daje się zmierzyć bezpośrednio. Przykładem mogą być temperatura na powierzchniach trących, szczeliny, poślizg miejscowy czy stopień tłumienia. Tu należy próbować, albo opracować nowe sensory, albo wielkości te obliczać w prosty sposób z wielkości mierzalnych.

6.2.2 *Przetwarzanie informacji*

Oddziaływanie na systemy mechaniczne za pomocą aktorów odbywa się, ogólnie biorąc, przez zmianę dróg (prędkości) lub sił podczas ruchu postępowego i przez zmianę odpowiednich wielkości podczas ruchu obrotowego. Potrzebne do tego przetwarzanie informacji sygnałów mierzalnych bezpośrednio może być podzielone na kilka płaszczyzn działania (rys. 6.6):

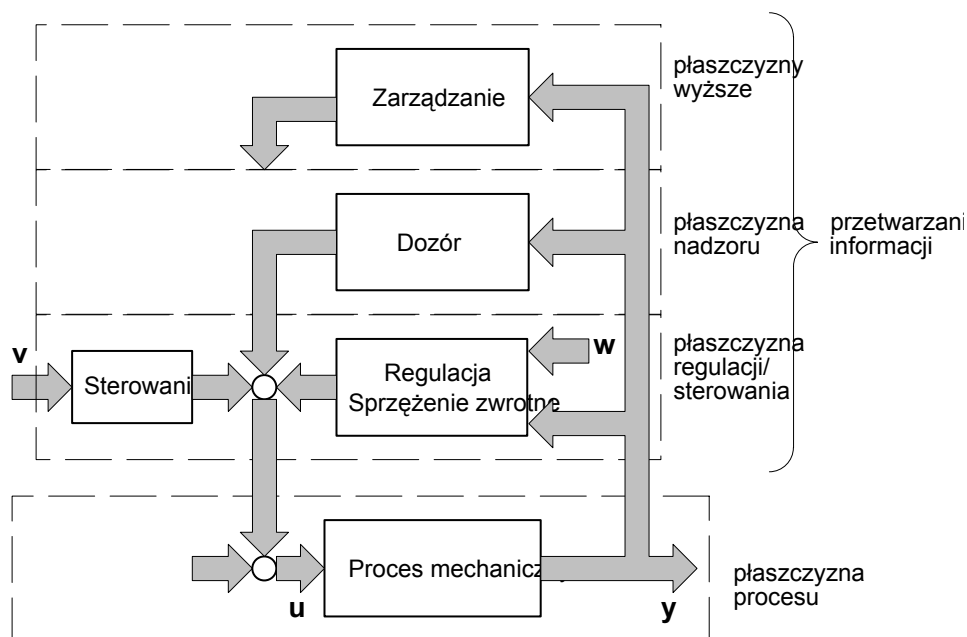
- płaszczyzna 1: sterowanie, regulacja, sprzężenie zwrotne w celu stabilizacji lub tłumienia;
- płaszczyzna 2: nadzór z meldowaniem alarmu (kontrola wartości granicznej), z automatyczną ochroną, z diagnozą uszkodzenia, z przedsięwzięciami redundacyjnymi (nadmiarowymi);
- płaszczyzna 3: optymalizacja (sprawność, zużycie, hałas, emisje), koordynacja podsystemów, ogólne zarządzanie procesem (dopasowanie do otoczenia, planowanie, zlecenia).

W ujęciu takim działania na płaszczyznach dolnych (nadzoru i regulacji) mają charakter lokalny, co przyspiesza reakcję. Działania na płaszczyznach górnych (optymalizacji i zarządzania) mają zaś charakter globalny i reagują wolniej.

Większość dotychczasowych podejść do systemów mechatronicznych śledzi przetwarzanie sygnału tylko w płaszczyznach dolnych, a więc na przykład regulowanie lub tłumienie ruchów lub proste nadzory. Cyfrowe przetwarzanie informacji pozwala jednak rozwiązywać wiele więcej zadań, np. nadzór z diagnozą uszkodzeń, rozstrzygnięcia dla przedsięwzięć redundacyjnych, optymalizację i koordynowanie.

Przetwarzanie informacji jest przeprowadzane zwykle za pomocą prostych algorytmów lub modułów oprogramowania w komputerach cyfrowych w czasie rzeczywistym. Algorytmy te zawierają dowolnie nastawialne parametry, które należy dopasować do statycznego i dynamicznego zachowania się procesu. Dopasowanie następuje, jak dotychczas, najczęściej przez wprowadzanie ręczne na podstawie prób lub wartości wynikających z doświadczenia. Ponieważ taki proces dopasowania może być bardzo trudny, próbuje się go zautomatyzować. W wielu przypadkach można to dopasowanie wykonać w sposób algorytmiczny przez zastosowanie

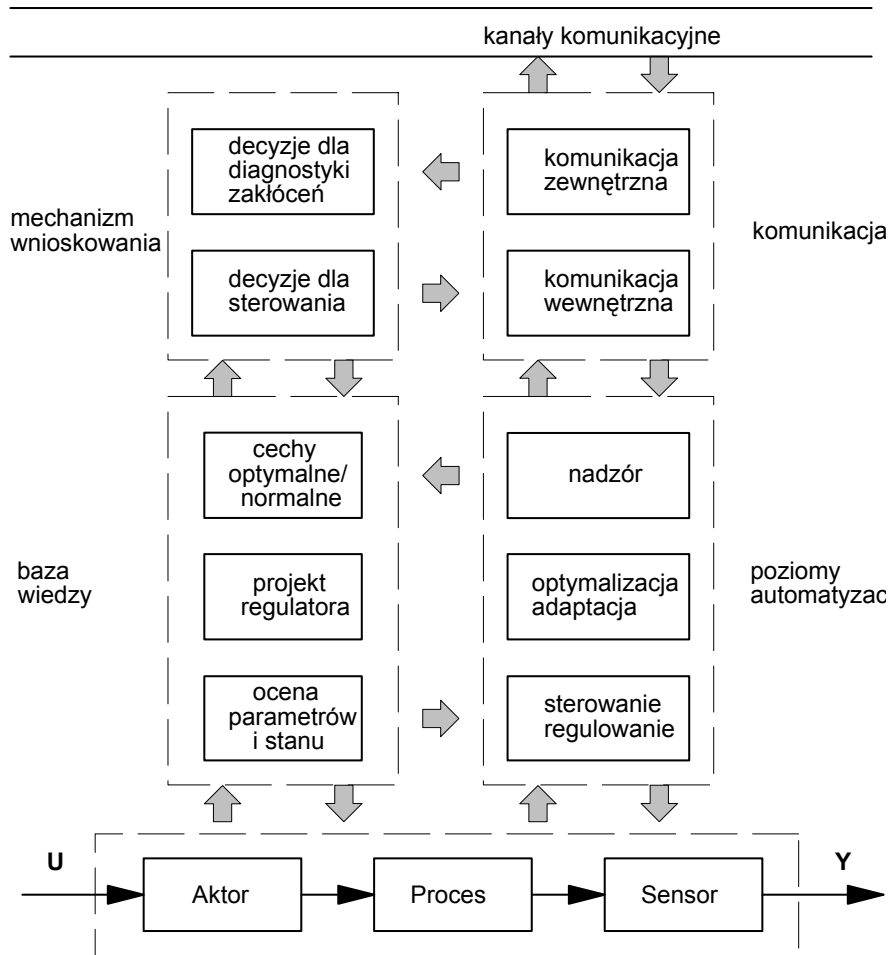
jednej z wielu metod projektowania układów sterowania. W tym celu potrzebne jest zdobywanie informacji w postaci matematycznego modelu procesu. Z pomierzonych sygnałów wejściowych i wyjściowych, przez właściwą metodę identyfikacji procesu, można uzyskać parametry modelu dynamicznego tego procesu.



Źródło: ISERMANN 1993

Rys. 6.6. Różne płaszczyzny przetwarzania informacji (automatyzacji) w systemach mechanicznych (u – wielkości nastawiające, y – wielkości mierzone, v – wielkości wejściowe, w – wielkości prowadzące)

Przez poprawianie zdobywania informacji mogą powstawać systemy mechaniczne o cechach „inteligentnych”. Jednak, w porównaniu z człowiekiem-operatorem, byłaby możliwa jak na razie tylko „inteligencja” niższego stopnia. Przez inteligencję należy przy tym rozumieć zdolność „do modelowania procesu i jego automatyzacji wewnątrz określonego obszaru, do uczenia się i do wyciągania wniosków z uwagi na działanie zorientowane na cel” [ISERMANN 1993]. Funkcje takie pokazuje rys. 6.7.



Źródło: ISERMANN 1993

Rys. 6.7. Inteligentny system całościowy niższego stopnia

Inteligentne systemy mechatroniczne mogą przykładowo:

- dopasowywać regulacje (i sterowania) do zwykle nieliniowego zachowania się (*adaptować się*),
- gromadzić ich parametry regulacji w zależności od punktu pracy i skutku (*uczyć się*),

- nadzorować wszystkie główne elementy,
- diagnozować uszkodzenia, aby wymagać konserwacji lub chwycić się przedsięwzięć redundantnych (fail safe, rekonfiguracja).

W ten sposób mogą powstawać systemy mechaniczne, które samoczynnie mogą się dopasowywać do zmieniających się zadań, sytuacji otoczenia czy strategii i które mogą się uczyć.

System inteligentny, opisany na rys. 6.7, może być także widziany jako mały system ekspertowy, pracujący bezpośrednio w czasie rzeczywistym. Można wtedy także mówić o systemie autonomicznym czy autarkicznym.

6.2.3 Układy elektroniczne

Postępujący stopień integracji w mikroelektronice prowadzi do coraz bardziej wygodnych rozwiązań z punktu widzenia kosztów i funkcji obliczeniowych, do większej odporności mechanicznej i do mniejszego zapotrzebowania na przestrzeń. Niektóre szybkie procesy mechaniczne wymagają względnie wysokich częstotliwości odczytywania (próbkiowania) w zakresie $5 \text{ Hz} < f_0 < 1000 \text{ Hz}$. Obszar przetwarzanej informacji wyznaczają szybkości obliczeń typowych mikrokomputerów. Mikroelektronika zamocowana bezpośrednio do urządzeń mechanicznych podlega wysokim obciążeniom mechanicznym, i po części termicznym, może być silnie zabrudzona przez kurz, wodę czy olej. Jakość wbudowania układu elektronicznego w maszynę (zamknięcie hermetyczne, prowadzenie kabli, chłodzenie itd.) musi być więc bardzo wysoka.

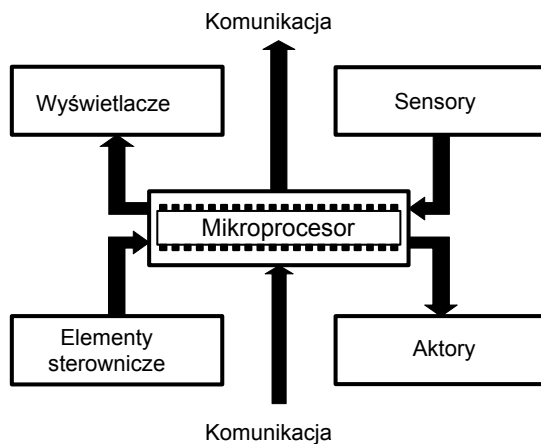
W systemach mechatronicznych mikroelektronika jest wymagana w wielu miejscach:

- przy sensorach – w celu wstępnej obróbki sygnału i filtrowania;
- przy aktorach – w celu regulacji położenia jak również w celu generalnej obróbki informacji dla całego systemu.

Z tych powodów układy mikroelektroniczne mogą być albo umieszczone oddzielnie, albo przestrzennie zintegrowane z sensorem, aktorem czy procesem mechanicznym.

6.3 Struktura funkcjonalna urządzenia mechatronicznego – – płaszczyzna porozumienia specjalistów z różnych dziedzin

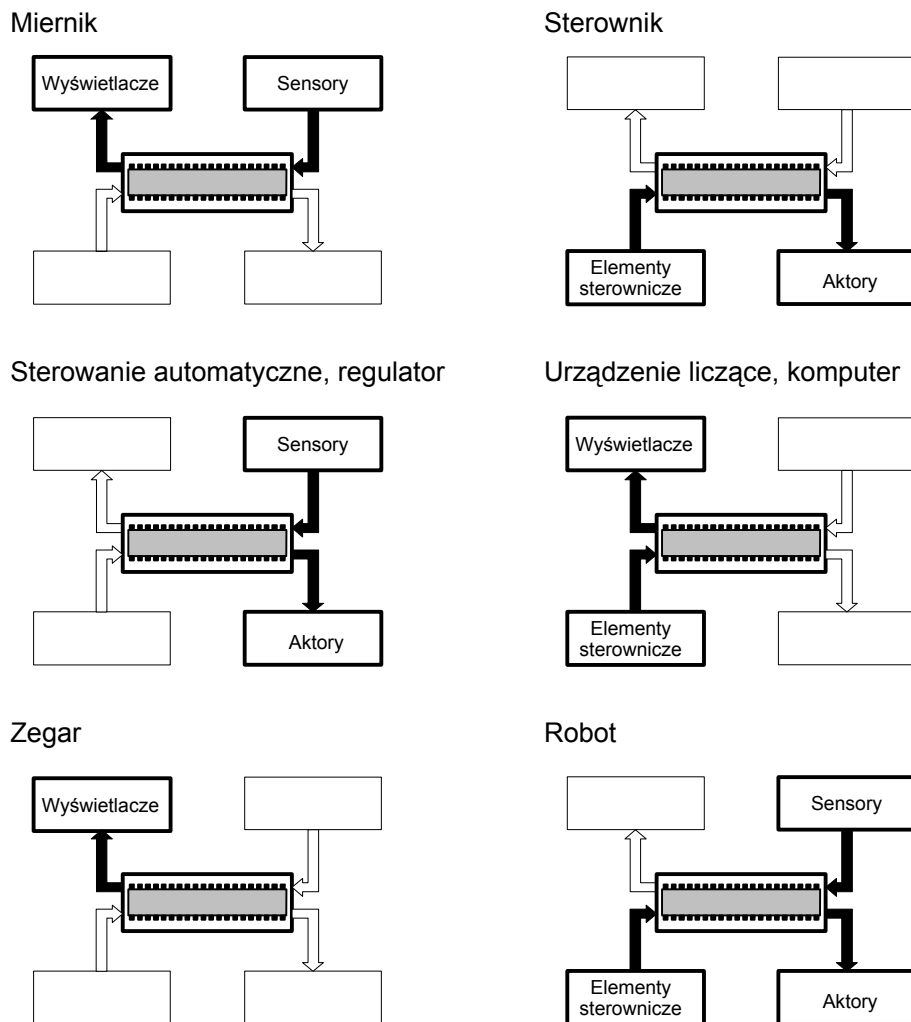
Podstawowe funkcje i strumienie informacji w urządzeniu mechatronicznym dają się przedstawić za pomocą stosunkowo prostego schematu (rys. 6.8). Schemat ten, wywodzącego się z ogólnej struktury urządzenia mechatronicznego (rys. 2.8), można określić jako *podstawowy schemat mechatronizacji*. Schemat ten bardzo ułatwia porozumiewanie się specjalistów z różnych dziedzin podczas opracowywania zadania mechatronicznego.



Rys. 6.8. Podstawowy schemat mechatronizacji

6.3.1 Funkcjonalny opis urządzeń mechatronicznych

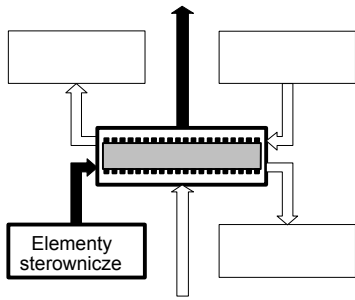
Jeżeli scharakteryzujemy główny strumień informacji, odpowiadający przeznaczeniu określonego urządzenia, to otrzymamy przegląd istotnych typów urządzeń mechatronicznych. Rysunek 6.9 pokazuje pierwszą grupę urządzeń, które niekoniecznie muszą mieć przewody do komunikowania się z człowiekiem lub innymi urządzeniami. W *miernikach* główny strumień informacji płynie z sensorów do wyświetlaczy; w *sterownikach* – z elementów sterowniczych do aktorów; w *regulatorach, kopiarkach i odtwarzaczach* – z sensorów do aktorów; a w *zegarach* – od mikroprocesora do wyświetlaczy. Wszystkie te urządzenia, jeżeli pracują ze sterowaniem centralnym, mogą być łatwo wyposażone w interfejsy komunikacyjne. Obserwuje się wyraźny trend w tym kierunku.



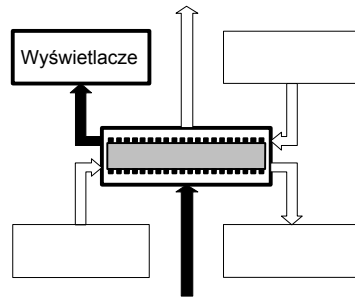
Rys. 6.9. Podstawowe typy urządzeń mechatronicznych bez komunikacji

Dla drugiej grupy urządzeń charakterystyczne są właśnie interfejsy komunikacyjne (rys. 6.10). Chodzi tu przede wszystkim o *urządzenia nadawcze, urządzenia zdalnego sterowania i przetwarzania informacji*.

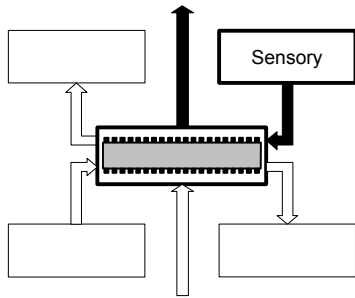
Nadajnik wiadomości



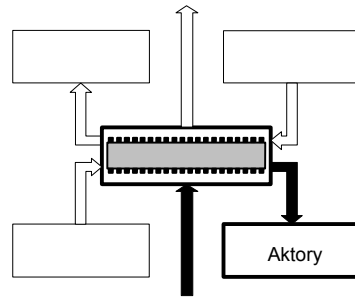
Odbiornik wiadomości



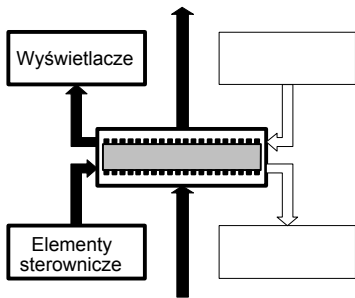
Nadajnik wielkości pomiarowych



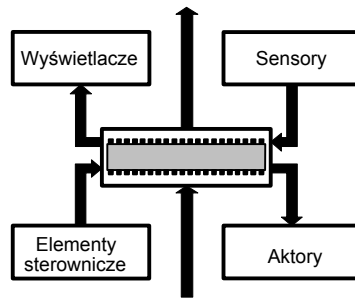
Odbiornik zdalnego sterowania



Urządzenie komunikacyjne



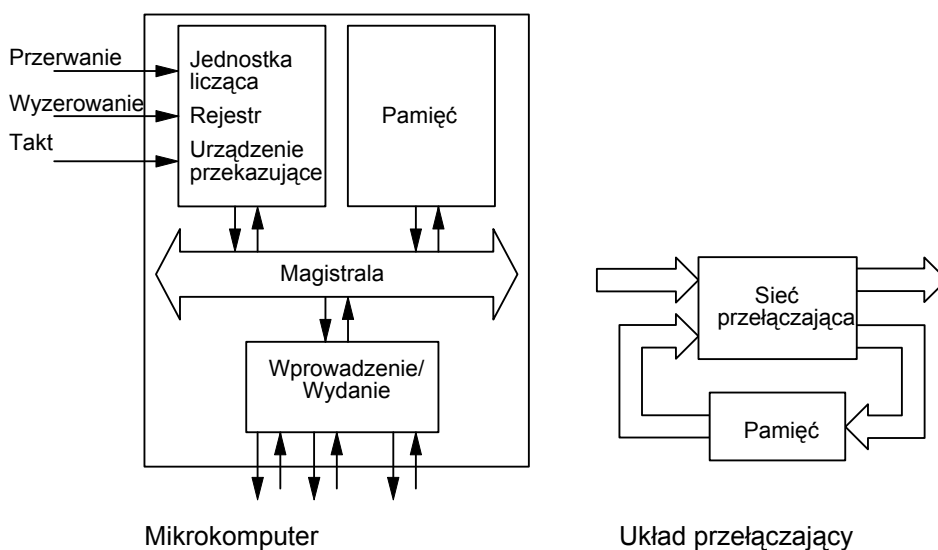
Urządzenie uniwersalne



Rys. 6.10. Podstawowe typy urządzeń z komunikacją

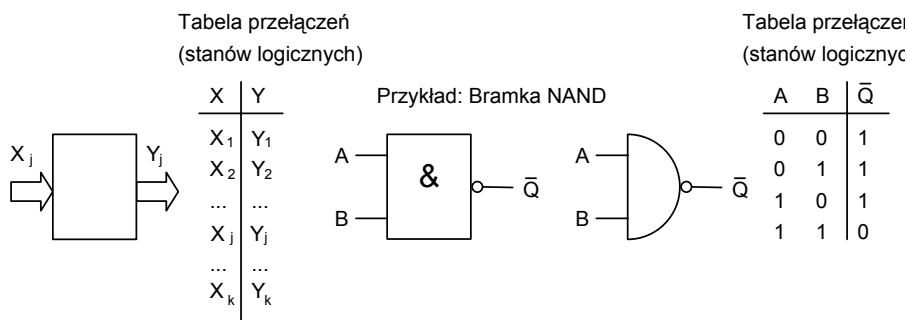
6.3.2 Mikroprocesor (mikrokomputer) jako urządzenie przełączające

Aby lepiej zrozumieć zadanie sterowania mikroelektronicznego i sposób myślenia projektanta oprogramowania, zajmijmy się nieco bliżej blokiem centralnym – mikroprocesorem. Wykonuje on przełączanie (sterowanie) w technice cyfrowej i składa się z dwóch istotnych elementów (rys. 6.11): sieci przełączającej i pamięci.



Źródło: HEINZL 1985

Rys. 6.11. Mikrokomputer jako urządzenie przełączające

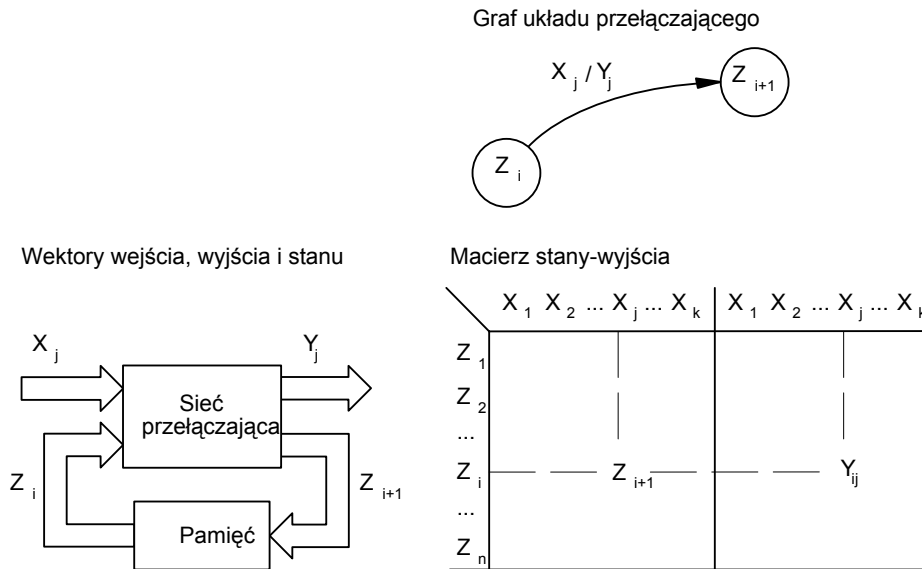


Źródło: HEINZL 1985

Rys. 6.12. Opis sieci przełączającej: wektory wejściowe i wyjściowe, oraz tabela stanów logicznych

Rozpatrzmy najpierw sieć przełączającą (rys. 6.12). Nie potrzebujemy wiedzieć jak ona w środku funkcjonuje, widzimy ją tylko jako system. Granica systemu jest

oznaczona jako „czarna skrzynka”. Stan logiczny połączeń przewodów wejściowych niech będzie opisany pewnym wektorem wejściowym, a stan logiczny połączeń przewodów wyjściowych pewnym wektorem wyjściowym. Jeżeli dla każdego wektora wejściowego istnieje tylko jeden możliwy wektor wyjściowy, to „czarna skrzynka” jest prawdziwą siecią przełączającą. Można ją wtedy opisać jedną, jedyłą tabelą przełączeń (tabela stanów logicznych, tabela prawdy), przyporządkowując każdemu wektorowi wejściowemu jeden wektor wyjściowy. Siecią przełączającą niech będzie na przykład bramka NAND. Jej tabela stanów logicznych zawiera cztery możliwe wektory wejściowe przy dwóch wejściach, od których jedynie zależą wektory wyjściowe. Część zależności logicznych nie może być jednak przez to opisana, ponieważ na wektor wyjściowy wpływają nie tylko wektory wejściowe, lecz także poprzednie stany, czyli „historia”. Typowym przykładem tego jest przerzutnik (flip-flop). Takie współzależności dają się łatwo ująć wtedy, gdy część przewodów wyjściowych sieci przełączającej jest odgałęziana i używana do odprowadzania pamięci (rys. 6.13).

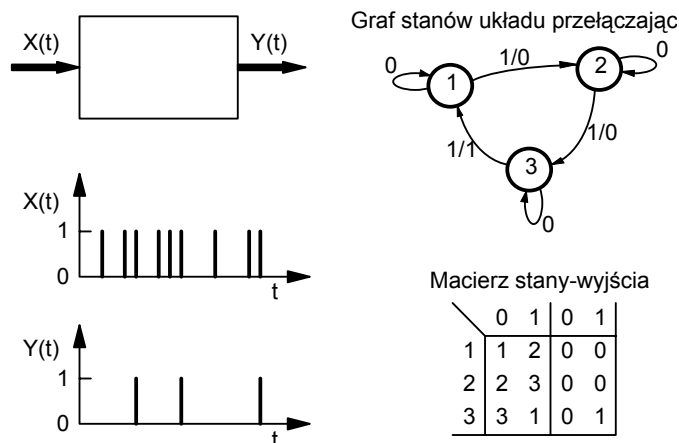


Źródło: HEINZL 1985

Rys. 6.13. Opis układu przełączającego: wektory wejścia, wyjścia i stanu, graf stanu i macierz stanów

Jeżeli odpowiedź pamięci wykorzystamy jako część wektora wejściowego w sieci przełączającej, to powstanie coś znacznie bardziej nieprzejrzystego, a mianowicie urządzenie przełączające. Wektor wyjściowy, na wyprowadzonych przewodach, nie zależy już tylko od wektora wejściowego na wyprowadzonych przewodach wejściowych, lecz także od poprzednich kroków przełączeń. Wektor, sterowany pamięcią, opisuje wszystko to, co jest jeszcze ważne z historii poprzednich przełączeń. Opisuje więc stan układu przełączającego. Dla każdego pojedynczego stanu układu przełączającego istnieje – dla każdego wektora wejściowego – jeden wektor wyjściowy i jeden stan przyszły.

W zapisie za pomocą grafów stany pozwalają się przedstawić jako węzły, a przejścia jako łuki. Dla całkowitego opisu wektorów wyjściowych musi istnieć tyle tabel prawdy, ile jest stanów. Dotyczy to również opisu stanów przyszłych (kolejnych). Tabele te można uporządkować do postaci macierzy i otrzymać opis układu przełączającego w postaci macierzy stany-wyjścia.



Źródło: HEINZL 1985

Rys. 6.14. Przykład układu przełączającego: dzielnik 1:3 z wielkościami wejściowymi, wyjściowymi, grafem stanów i macierzą

Przykładem prostego układu przełączającego może być przełączanie dzielnikowe na rys. 6.14. Niech na wejściu istnieje dowolna kolejność (sekwencja) impulsów jednobiegunowych. Tylko co trzeci impuls powinien być przełączany do wyjścia. Od „historii”, czyli od liczby wyświetlonych impulsów, zależy więc to jak ma się zachować kolejny impuls. Dlatego graf stanu musi odzwierciedlać trzy stany, a mianowicie: pierwszy impuls wyświetlony, drugi impuls wyświetlony, trzeci impuls przełączony. Każdorazowo możliwe są dwa wektory wejściowe: impuls

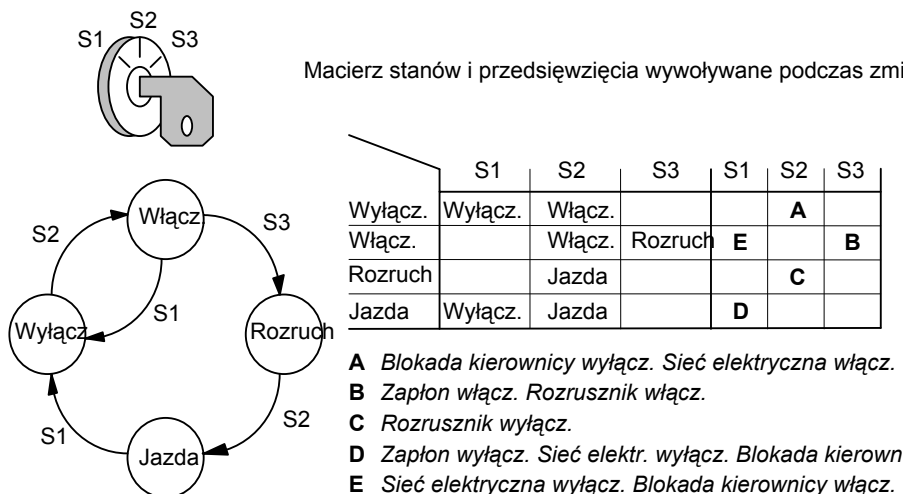
istnieje lub nie. Na podstawie macierzy stany-wyjścia rozpoznaje się czy opis jest całkowity i czy wszystkie zmiany stanu są zdefiniowane.

Mikrokomputer (mikroprocesor) jest w swej zasadzie układem przełączającym, a oprogramowanie – istotną treścią pamięci. Liczba możliwych stanów przełączenia odpowiada liczbie rozkazów programu na najniższym poziomie języka i graf stanu byłby zbyt obszerny do opisu szczegółowego. Dlatego w celu wizualizacji poszczególnych odcinków programu i rozkazów programu istnieją inne możliwości przedstawienia, np. strukturogramy. W dialogu z użytkownikiem urządzenie zachowuje się, w stosunku do wielkości wejściowych pochodzących od użytkownika, jako układ przełączający. Ma więc sens rozróżnianie stanów na powierzchni użytkowej urządzenia i wskazywanie ich tak, aby użytkownik sam nie musiał zauważać "historii". Dlatego graf stanów i macierz stanów nadają się do opisu i uzupełnienia dialogu użytkownika.

6.3.3 Przykład

Przykład z praktyki życia codziennego. Kluczyk samochodowy jest przede wszystkim elementem sterowniczym. Jednocześnie jest wskaźnikiem (wyświetlaczem), aczkolwiek niedoskonałym. I tak z położenia przełącznika S2 na rys. 6.15 nie widać czy silnik pracuje czy nie. Oczywiście wie się o tym lub słyszy się go. Stan pracy (stan operacyjny) silnika i tym samym pojazdu zależy od „historii”; w tym przypadku od tego, czy kluczyk przedtem dostatecznie długo znajdował się w położeniu S3 (Rozruch) i czy wszystkie systemy częściowe są w porządku. Przedstawiając stany operacyjne jako koła, a przejścia jako strzałki otrzymuje się graf stanów na rys. 6.15. Jeżeli nie weźmie się pod uwagę zakłóceń, to można rozróżnić cztery stany: wyłączenie, włączenie, rozruch i jazdę. Przejścia z jednego stanu do kolejnego następują w zależności od wielkości wejściowych, w naszym przypadku od położenia kluczyka. Dlatego przejścia scharakteryzowane są tymi położeniami kluczyka, którymi są wywoływane. Niektóre przejścia są świadomie zlikwidowane, np. rozruch podczas jazdy. Dlatego wprowadzone są strzałki, a niektóre koła nie są połączone strzałkami bezpośrednio. Tego, czy graf stanów jest kompletny, nie widać. Do sprawdzenia kompletności nadaje się raczej macierz stanów, czyli zbiór tabel prawd. Podaje ona – w zależności od stanu istniejącego i wielkości wejściowych – stan kolejny i wielkości wyjściowe. Wielkości wyjściowe są tu przedsięwzięciami, które mają być wywołane podczas danego przejścia. Macierz stanów dla naszego przykładu widać po prawej stronie rys. 6.15. Każdy wiersz dotyczy jednego możliwego stanu, każda kolumna – jednej możliwej wielkości wyjściowej. Po lewej stronie macierzy podane są stany kolejne, po prawej – wielkości wyjściowe. Wielkości wyjściowe są przedstawione symbolicznie, za pomocą liter, z

których każda oznacza pęk wywoływanych przedsięwzięć. Te ostatnie wypisane są pod macierzą.



Źródło: HEINZL 1985

Rys. 6.15. Kluczyk samochodowy i opis stanów operacyjnych samochodu

Podczas odwzorowywania grafu stanów w macierz stanów niektóre pola pozostają wolne. I tak pole S3 w stanie „jazda” przedstawia przejście, które należy wyłączyć. Może ono bowiem prowadzić do zakłóceń, gdy wystąpi. Graf stanów daje się uzupełnić przez sprawdzenie i wypełnienie pustych pól. Wyjściowa strona macierzy stanów informuje nas o tym, które procesy cząstkowe należy sterować.

6.4 Ustalanie struktury funkcjonalnej – modele i metody

Aby omawiać i dyskutować idee konstrukcyjne maszyny we wczesnych etapach jej projektowania i konstruowania, potrzebujemy sposobów opisania (czy modelowania) tych idei. W przypadku systemu mechatronicznego jest to szczególnie trudne, ponieważ jedna idea będzie zwykle obejmować rozważania podsystemów mechanicznych, elektronicznych i oprogramowania. Dla takiego rozwiązania konstrukcyjnego można używać terminu *koncepcji konstrukcyjnej*. W naszych rozważaniach ograniczymy się tylko do wzajemnego funkcjonalnego oddziaływania (interakcji funkcjonalnej) mechaniki, elektroniki i oprogramowania, ponieważ metody konieczne do przestrzennego rozplanowania podsystemów mechanicznych i elektronicznych (np. upakowanie elektroniki) różnią się zasadniczo.

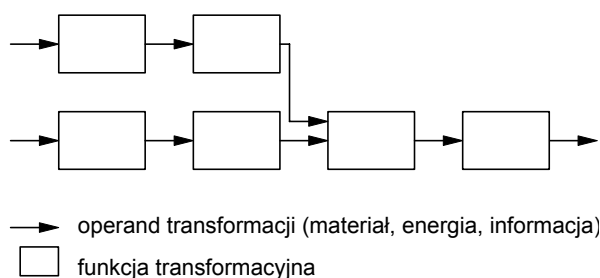
Jeżeli mówimy o funkcji produktu lub systemu, to zwykle nie jesteśmy precyzyjni. Albo myślimy o tym *co system robi* (jego celu, zamierzonej funkcji), albo o tym *jak on to robi* (jak on działa). Żeby projektować i konstruować systematycznie, musimy używać terminów bardziej jednoznacznych. Inaczej nie będziemy mogli opisać abstrakcyjnie tego, co wiemy, przed rozpoczęciem poszukiwania szczegółowych rozwiązań technicznych. W szczególności trzy terminy wymagają ścisłej definicji:

<i>funkcje transformacyjne</i>	tj. transformacje wejść w wyjścia, wykonywane przez system mechatroniczny;
<i>funkcje celowe</i>	tj. efekty fizyczne, wymagane w systemie mechatronicznym w celu wykonywania transformacji, oraz
<i>stany systemu</i>	tj. sytuacje logiczne, które determinują jakie transformacje będą wykonywane przez system mechatroniczny.

Poniżej przedstawimy te terminy i relacje między nimi tak, jak to widzi BUUR [1995].

6.4.1 Funkcje transformacyjne

System mechatroniczny może być opisany przez swą zdolność do transformowania materiału, energii czy informacji. Na przykład robot przemieszcza materiał, silnik przetwarza energię, a telefon przekazuje informację. System mechatroniczny możemy widzieć jako strukturę funkcji transformacyjnych, które przetwarzają (procesują) jeden z następujących operandów transformacji: materiał, energię lub informację (rys. 6.16).



Źródło: BUUR 1995

Rys. 6.16. System mechatroniczny opisany jako struktura funkcji transformacyjnych

Pojęcie transformacji jest bardzo przydatne do opisywania celów systemów mechanicznych, elektronicznych i systemów oprogramowania. Należy przy tym jednak zauważyć, że elektronika może transformować tylko informacje.

Strukturę funkcjonalną transformacji możemy wizualizować w postaci schematów blokowych („czarnych skrzynek”). Schemat taki pokazuje *co* dzieje się z operan- dem transformacji, a nie *jak* system mechatroniczny to czyni. Schemat blokowy jest więc niezależny od realizacji technicznych i może być używany do tworzenia konstrukcji alternatywnych, na wysokim poziomie abstrakcji. Typowymi drogami tworzenia alternatyw są:

- przemieszczanie granicy systemu,
- dzielenie transformacji na podfunkcje,
- integrowanie podfunkcji,
- ustalanie równoległych gałęzi transformacji,
- wprowadzanie transformatorów lub przewodników,
- przemieszczanie wejść informacji lub zmienianie jej nośników.

System mechatroniczny transformuje przede wszystkim informację, albo jako swój główny cel (np. telefax), albo steruje procesami materiałowymi czy energetycznymi (np. elektroniczna maszyna do szycia, silnik „inteligentny”). Zauważmy, że informacja istnieje w systemie mechatronicznym tylko wtedy, gdy jest przywiązana do materiału (np. fotokopia, próbka krwi) lub do energii. (np. sygnał elektryczny, sygnał dźwiękowy). Jeżeli informacja jest kodowana na jakiejś formie energii, to mówimy zwykle o *sygnale*.

Z ogólnego punktu widzenia system mechatroniczny operuje dwoma rodzajami informacji:

- *informacją procesową*, która jest transformowana przez system mechatroniczny niezależnie od jej wartości semantycznej (jej znaczenia),
- *informację sterowniczą*, którą system mechatroniczny stosuje do sterowania funkcji wewnętrznych (informacja ta jest „rozumiana” przez system).

Na każdym poziomie możemy względnie łatwo rozróżnić oba rodzaje informacji. Jeżeli jednak mieć na uwadze przepływ informacji na kilku poziomach hierar- chicznych, to rozróżnienie nie jest takie jasne. Elektroniczne sprzężenie zwrotne w robocie operuje informacją sterowniczą, ponieważ jej celem jest sterować ru- chami robota. Jeżeli jednak skupimy się na sensorze i obwodzie przetwarzania sygnału w pętli sprzężenia zwrotnego, to ta sama informacja nabiera charakteru procesowego. Z punktu widzenia sensora i obwodu wartość semantyczna przetwa- rzanej informacji nie ma żadnego wpływu na ich funkcjonowanie.

W systemach mechatronicznych informacja procesowa i sterownicza ujawnia się alternatywnie w strukturze hierarchicznej: sygnały sterowania potrzebują przetwarzania sygnału a systemy przetwarzania sygnału często potrzebują sterowania na niższym poziomie.

6.4.2 Funkcje celowe

System mechatroniczny ma zdolność tworzenia potrzebnych efektów fizykalnych, czyli skutków określonych zjawisk fizykalnych (także chemicznych czy biologicznych). Tę zdolność będziemy nazywać *funkcją celową*. Myślenie w kategoriach takich funkcji jest bardzo typowe dla konstruktorów maszyn. Na przykład konstruktor może powiedzieć: „potrzebuję czegoś, co wytwarza ruch obrotowy”. *Ruch obrotowy* jest tu pożądanym efektem, a *wytwarza ruch obrotowy* jest funkcją zamierzoną podsystemu (silnika).

System mechatroniczny możemy widzieć jako strukturę funkcji celowych. Typowymi przykładami funkcji celowych są: „zmiierz poziom”, „pozwól na ręczne dopasowanie”, „zapamiętaj wartość”, „porównaj z wzorcem”, „podtrzymuj wał”. Struktura funkcji celowych zawiera wszystkie te efekty, które są konieczne, aby system mechatroniczny spełniał swój cel.

Ważną cechą metodycznego projektowania i konstruowania jest możliwość podziału funkcji na jednostki niższego poziomu (podfunkcje, funkcje drugiego rzędu, funkcje wtórne). Dla systemu mechatronicznego słuszna jest pewna zasada podstawowa. Stwierdza ona, że do realizacji dowolnej funkcji w systemie wymagana jest jedna lub więcej następujących funkcji wtórnych:

- *funkcji energetycznej* w celu zasilania w energię,
- *funkcji sterowniczej* w celu sterowania stanem systemu,
- *funkcji interfejsowej* w celu konwersji (przetwarzania) wejść i wyjść,
- *funkcji zabezpieczeniowej* w celu zapobiegania niepożądanemu współdziałaniu z otoczeniem,
- *funkcji komunikacyjnej* w celu interakcji z innymi systemami,
- *funkcji strukturalnej* w celu zapewnienia podparcia mechanicznego

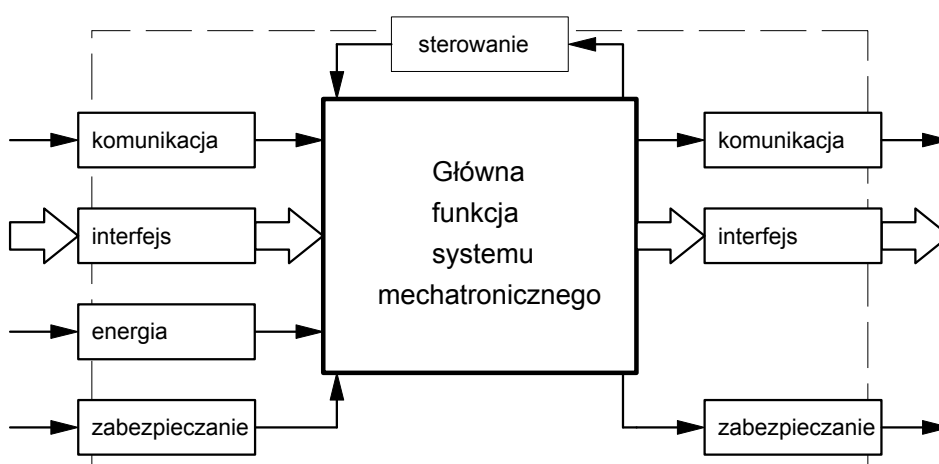
Weźmy jako przykład żarówkę rzutnika pisma. Sama żarówka daje światło, ale aby to robiła, musi być otwór, wtyczka prądu przemiennego i transformator (funkcja energetyczna), przełącznik wł./wył. (funkcja sterownicza), obudowa lampy (funkcja interfejsowa i funkcja strukturalna) i wentylator (funkcja zabezpieczeniowa). Mamy więc zestaw funkcji drugiego rzędu.

Jak rozróżnić funkcje celowe od funkcji transformacyjnych? Funkcja transformacyjna silnika elektrycznego to transformacja mocy elektrycznej (wejście) w mechaniczny ruch obrotowy (wyjście). Jest to transformacja energii. Funkcją celową silnika jest „wytworzyć ruch obrotowy”. Transformacja jest tu środkiem do realizacji pożądanej funkcji celowej: „Jak tworzymy ruch obrotowy? Przez transformowanie...” – można pomyśleć o wielu innych transformacjach, które mogą realizować tę samą funkcję celową (np. silnik hydrauliczny, mechanizm zegarowy).

Z drugiej strony szczegółowa transformacja może być wykonywana tylko wtedy, gdy na niższym poziomie dostępny jest zestaw efektów (funkcje celowe). Dla silnika elektrycznego są to: „przyjmować moc elektryczną”, „tworzyć wirujące pole magnetyczne” itp. Istnieje więc pewna zależność przyczynowo-skutkowa między funkcjami transformacyjnymi i celowymi.

6.4.3 Model systemu

Gdy wyrazimy złożone funkcje wtórne w terminach transformacji, możemy wyprowadzić ogólny model blokowy systemu mechatronicznego (rys. 6.17). Pokazuje on główną funkcję transformacji i wszystkie funkcje wtórne tej całości.



Źródło: BUUR 1995

Rys. 6.17. Ogólny model funkcji systemów mechatronicznych

Funkcje wtórne są umieszczone na granicy systemu w celu wskazywania, że mogą być one dzielone z systemami przyłączanymi. Na przykład między dwoma systemami linii przetwarzania sygnału będzie tylko jedna funkcja interfejsowa. Funkcja

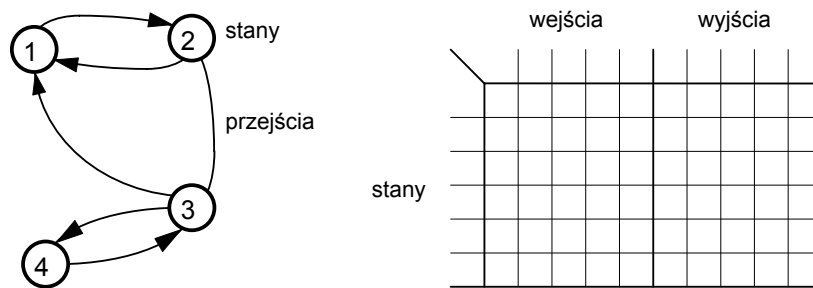
strukturalna nie została włączona w ten model, ponieważ nie może być ona czytelnie wyrażona w terminologii transformacji.

Taki model systemu jest *rekurencyjny*, czyli daje się wyrazić za pomocą elementów uprzednio znanych. Oznacza to, że może być zastosowany do opisanie mechatroniki na wszystkich poziomach – na poziomie elementów, poziomie modułów, poziomie produktów i poziomie systemów. Główna zaleta modelu polega na wyjaśnianiu relacji między funkcjami pierwotnymi i wtórnymi. Stosowanie go jako narzędzia projektowania nie jest jednak łatwe, ponieważ relacje między blokami szybko stają się zbyt złożone, aby umożliwić łatwe szkicowanie na papierze.

6.4.4 Logiczne zachowanie się systemu mechatronicznego

Wszystkie systemy mechatroniczne funkcjonują w kilku *stanach*, przy czym liczba dwa jest najmniejszą liczbą stanów (włączony i wyłączony). Na przykład kserokopiarka wykazuje zwykle istnienie pięć stanów: *włączenie*, *podgrzewanie*, *gotowość*, *kopiowanie* i *błąd*. W każdym ze stanów system funkcjonuje różnie.

Punkt, w którym system przechodzi z jednego stanu w drugi, wynika z logicznych warunków wewnątrz systemu lub z interakcji między operatorem i systemem. I tak kserokopiarka zmienia stan z *podgrzewania* na *gotowość*, gdy element grzejny osiągnie pożądaną temperaturę; przejście z *gotowości* do *kopiowania* zdarza się wtedy, gdy użytkownik naciśnie guzik. Relacje logiczne są zwykle wyrażane w postaci „*jeśli... (warunek), to... (przejście)*”.



Źródło: BUUR 1995

Rys. 6.18. Logiczne zachowanie się systemów mechatronicznych może być opisane w postaci diagramu czy macierzy stan-przejście

Konstruktor będzie często opisywać strukturę stanów i przejść w postaci tablicy „stany-przejścia” czy macierzy „stany-przejścia” (rys. 6.18). Zarówno tablice jak i macierze wyszczególniają całkowitą liczbę możliwych stanów i wszystkie dopuszczalne przejścia między stanami. Tablica jest wygodna do ilustrowania struk-

tury: „stany-przejście”, macierz jest dobra dla sprawdzania kompletności i wykluczenia się dwuznaczności. Wspominaliśmy już o tym w punkcie 6.3.3.

Zarówno systemy mechaniczne, elektryczne jak i systemy oprogramowania zachowują się w sposób, który może być opisany w postaci: stan-przejście. Struktura stanowo-przejściowa jest koniecznością podczas opracowywania oprogramowania sterowniczego dla systemów mechatronicznych.

Opis stanowo-przejściowy systemu mechatronicznego musi, naturalnie, w jakiś sposób odnosić się do struktur funkcjonalnych transformacji i zamierzeń. Ponieważ system operuje różnie w każdym stanie, struktury funkcjonalne muszą zmieniać się stosownie do stanów. W istocie musimy opisać różne struktury funkcjonalne transformacji dla poszczególnych stanów systemu.

Weźmy na przykład urządzenie wideo. Transformacje objawiające się w stanach: *nagrywanie* i *odtworzenie* są całkowicie różne. W pierwszym elektroniczny sygnał wizyjny jest transformowany we wzór magnetyczny na taśmie, w drugim zachodzi proces odwrotny.

Aby precyzyjnie opisać transformacyjną strukturę funkcjonalną i logiczne zachowanie się systemu mechatronicznego, musimy być pewni, że transformacyjna struktura funkcjonalna dla każdego stanu jest stabilna, tj. nie może on być nagle zmieniony do innego wyjścia. Zilustrować to można prostym przykładem (rys. 6.19).

Zalóżmy, że chcemy zaprojektować inteligentny system oświetlenia pomieszczenia. System powinien automatycznie włączać światło gdy ludzie są obecni w pomieszczeniu a natężenie światła powinno być dopasowane do natężenia światła dziennego. Jeżeli spróbujemy opisać transformacyjną funkcję systemu bez myślenia o stanach logicznych, to wyjściem może być „teraz światło a potem o pełnym zmiennym natężeniu” (rys. 6.19). Transformacja taka nie jest stabilna. Wyjście zmieni się gwałtownie, zależnie od wejścia informacji o stanie zajmowania pomieszczenia.

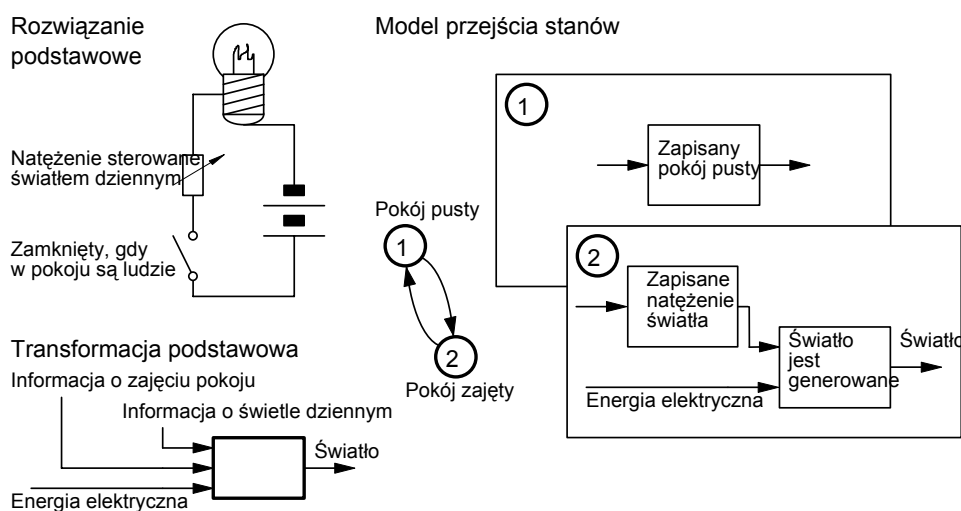
Zamiast powyższego możemy rozłożyć (zdekomponować) transformacyjną strukturę funkcjonalną na dwie oddzielne struktury, po jednej dla każdego z dwóch stanów: *pomieszczenie puste* i *pomieszczenie zajęte*.

Popatrzymy teraz na relację między zamierzeniową (celową) strukturą funkcjonalną i logicznym zachowaniem się systemu mechatronicznego. Zamierzeniową strukturę funkcjonalną możemy traktować jako zawartość tablicy wszystkich efektów potrzebnych do tego, aby system działał. Wtedy tylko niektóre z funkcji będą aktywne w każdym ze stanów systemu. Rysunek 6.20 przedstawia przykład zamierzeniowej struktury funkcjonalnej telefonu pokazując jakie funkcje są aktywne w każdym z czterech stanów.

6.4.5 System mechatroniczny jako struktura organów

Opis funkcjonalny jest niezależny od konkretnych rozwiązań fizykalnych i konstrukcyjnych. Aby przejść do tych ostatnich, potrzebujemy opisać termin „organ”. *Organem* nazywać będziemy zestaw części, który wykorzystuje zjawiska fizykalne, chemiczne czy biologiczne do tworzenia pożądanej funkcji. Silnik elektryczny jest np. organem, który wykorzystuje efekt elektromagnetyczny do tworzenia ruchu obrotowego.

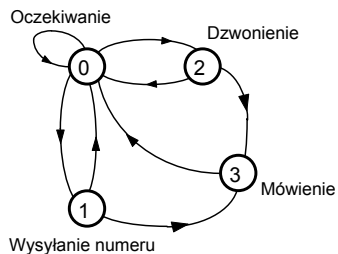
Słowo „organ” zostało wybrane po to, aby podkreślić analogię z organami ciała ludzkiego. Te ostatnie są zwykle bytami (jednostkami), które realizują jedną, szczególną funkcję. System mechatroniczny możemy traktować jako strukturę organów, z których każdy realizuje jedną lub więcej funkcji. Jest to rozumowanie bardzo bliskie sposobowi rozumowania większości konstruktorów podczas sugerowania rozwiązań. Na przykład, gdy konstruktor mówi „możemy użyć silnika z odpowiednią przekładnią i enkoderem kąta...”, sugeruje strukturę trzech organów: *silnika*, *reduktora* i *enkodera kąтового* w celu zapewnienia pożądanej funkcji.



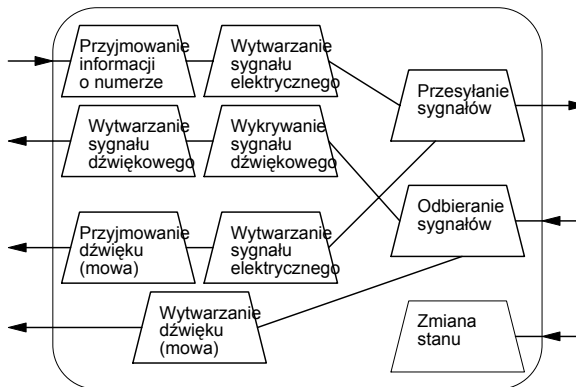
Źródło: BUUR 1995

Rys. 6.19. „Inteligentny” system oświetlenia: przykład relacji między strukturą funkcjonalną transformacji podstawowej i strukturą przejścia stanów

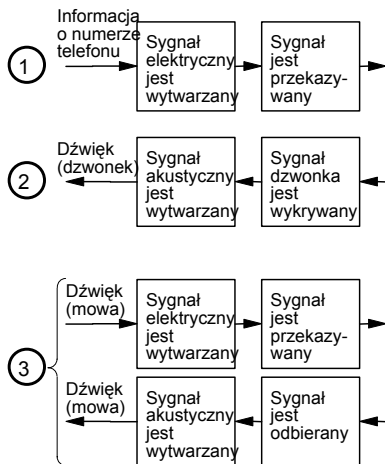
Stany i przejścia



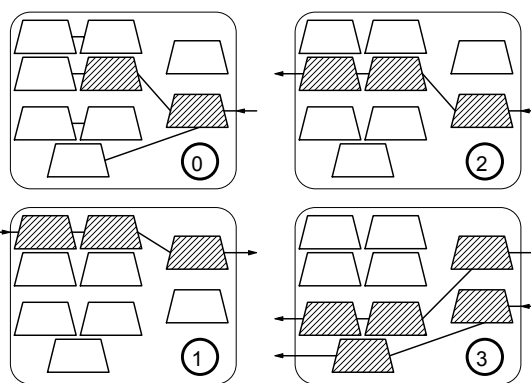
Struktura funkcji celowych



Funkcje transformacyjne



Aktywne funkcje celowe



Źródło: BUUR 1995

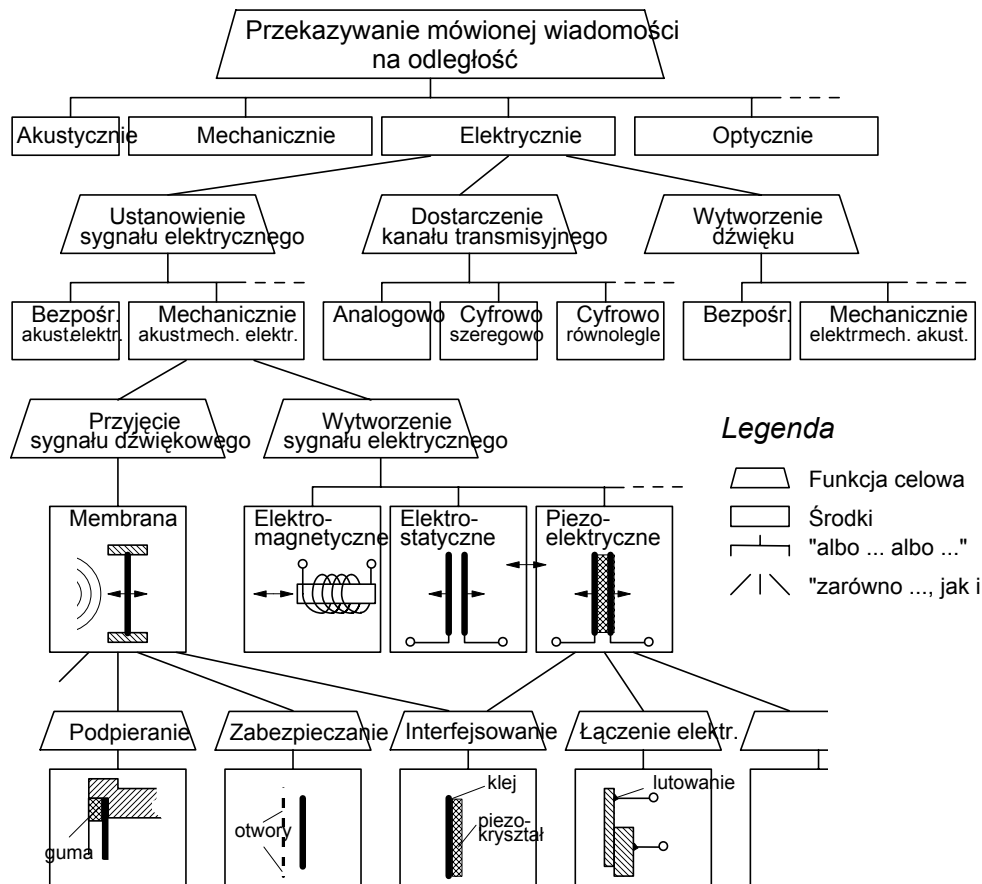
Rys. 6.20. Logiczne zachowanie się telefonu i jego dwie struktury funkcjonalne: transformacyjna i celowa

Elementy elektroniczne, takie jak np. tranzystor czy potencjometr, mogą być również traktowane jako organy; tak długo, jak długo konstruktor myśli o ich funkcjach, a nie o dokładnym typie czy wymiarach. Mikroprocesor zaś nie może być traktowany jako organ dopóty, dopóki nie ma zamierzonego oprogramowania. Tylko z oprogramowaniem spełnia on funkcję szczegółową. Oprogramowanie samo w sobie nie może być organem.

Popatrzmy teraz na relacje między funkcjami (celowymi) i organami. Organy są artefaktami fizycznymi, które realizują funkcje. Jednak bezpośrednie odwzorowanie między funkcjami i organami jest rzadko możliwe. Wynika to stąd, że konkretny organ może czasami spełniać więcej niż jedną funkcję. Dla każdej wymaganej

funkcji możemy zwykle wybrać kilka organów alternatywnych, które dają ten sam efekt. Czyni to konstruowanie trudnym i interesującym: należy wybrać najbardziej właściwe rozwiązanie dla każdej funkcji.

Miedzy funkcjami i organami istnieje związek przyczynowo-skutkowy. Organy, które realizują określoną funkcję na jednym poziomie, będą wymagać zestawu podfunkcji na kolejnym, niższym poziomie. Każda podfunkcja może znowu być realizowana przez (pod)organy. Relacja ta jest pokazana na rys 6.21 jako *drzewo funkcja – środek*.



Źródło: BUUR 1995

Rys. 6.21. Drzewo funkcja – środek dla systemu telefonicznego

Drzewo „funkcja–środek” jest narzędziem konstrukcyjnym. Odwzorowuje ono hierarchiczny wzorzec funkcji i alternatywne rozwiązania systemu mechatronicznego. Na wierzchołku drzewa środki, realizujące funkcje (celowe), są strukturami transformacyjnymi; dalej, niżej stają się organami.

Kompleks funkcji wtórnych jest pomocny, gdy próbujemy szukać jakich podfunkcji będzie wymagać szczegółowy wybór organu na następnym poziomie. Wybranie między dwoma alternatywnymi organami nie będzie często możliwe dopóty, dopóki nie zbada się skutków każdego wyboru pary poziomów w dół drzewa.

6.4.6 Organy interfejsowe



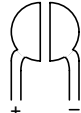
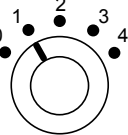
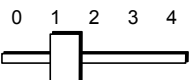


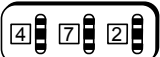


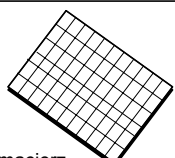
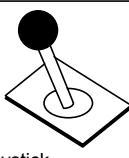
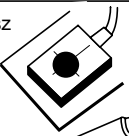
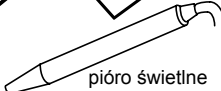
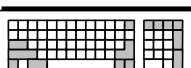

Typem organu, który wymaga szczególnej uwagi w konstruowaniu mechatronicznym, jest *organ interfejsowy*. Określa on granice między systemem i jego środowiskiem i wewnątrz między podsystemami. Przystudujmy niektóre charakterystyczne interfejsy i ich organy.

Interfejs człowiek–maszyna jest przede wszystkim stworzony z organów, które wysyłają i odbierają informację, czyli elementów sterowniczych i wyświetlaczy. Czasami interfejs ten jest także warunkiem wejścia energetycznego, np. dźwignie, pokrętła. Ponieważ informacja musi być powiązana albo z energią, albo z materiałem, stosunkowo łatwo jest systematyzować te organy. Konstruktor może wybierać z takiej systematyki (rys. 6.22 podaje przykłady elementów sterowniczych).

Interfejs systemowy określa relacje między systemami sąsiadującymi. Systemy mechatroniczne mogą wymieniać materiał, energię i informację. Na przykład interfejs między kserokopiarką i sortownikiem operuje papierem. Typowymi mechanicznymi organami interfejsowymi są sprzęgła, elektrycznymi – złącza wtykowe. W przypadku interfejsów komunikacji elektronicznej organ musi być często uzupełniony protokołem komunikacyjnym (zbiorem reguł sterujących wymianą informacji pomiędzy dwoma lub wieloma niezależnymi urządzeniami lub procesami) i typowym zestawem znaków.

Interfejs środowiskowy zwykle przykrywa obudowy, struktury chłodzące, wentylatory itd. Wymieniają one materiał, energię i informację ze środowiskiem systemu.

Interfejs elektromechaniczny określa granicę między podsystemami mechanicznymi i elektronicznymi. Organ interfejsowy może mieć tylko postać sensora i aktora. Te organy nie mogą wymieniać materiału, a tylko energię i informację.

Informacja	Organ sterowniczy		
Binarna (włączony/wyłączony)	<p>włączone</p>  <p>przełącznik</p> <p>wyłączone</p>	<p>guzik wciskany</p> 	<p>pojemnościowy sensor dotyku</p> 
Pozycje (wybór stanu)	<p>obrotowy</p> 	<p>liniowy</p> 	<p>przełącznik</p> 
	<p>zestaw klawiszy</p> 	<p>koła pokręcane kciukiem</p> 	
Analogowa (wybór poziomu)	 <p>potencjometry</p>		<p>+ mocniej</p> <p>- słabiej</p>
Pozycja dwuwymiarowa	 <p>macierz czuła na dotyk</p>	 <p>joystick</p>	<p>mysz</p>  <p>pióro świetlne</p> 
Tekst napisany	 <p>klawiatura</p>		
Słowo wypowiedziane	 <p>mikrofon + rozpoznanie głosu</p>		

Źródło: BUUR 1995

Rys. 6.22. Przykłady elementów sterowniczych dla interfejsu człowiek-maszyna w systemach mechatronicznych

6.4.7 Struktura działania

Opis struktury organicznej jest kompletny dopiero wtedy, gdy dołączona jest informacja o zachowaniu się wszystkich organów i ich relacji. Rysunek 6.23 pokazuje różne narzędzia, które określają sześć różnych punktów widzenia zachowania się systemu:

1. *Przepływy informacji i danych*, tj. zdefiniowanie przepływu informacji przez system, na różnych poziomach.
2. *Przepływy mocy i energii*, tj. zdefiniowanie przepływu energii między poszczególnymi sieciami wielowejścio- i wyjściowymi.
3. *Stany i przejścia*, tj. stany organu, dozwolone przejścia stanu i warunki zmiany z jednego stanu w drugi.
4. *Procedury sekwencyjne*, tj. działania (operacje) i jak one następują, jedna po drugiej, w sekwencji.
5. *Hierarchię przetwarzania informacji*, tj. działania (operacje) i jak one odnoszą się, jedno do drugich, na poziomie wyższym i podporządkowanym.
6. *Taktowanie*, tj. czasowe ograniczenia wykonania czynności.
7. *Strukturę funkcjonalną*, tj. wymagane efekty, szczególnie w obszarze mechanicznym, które nie dadzą się opisać w terminach przepływu i transformacji.

Narzędzia te zmieniają się tak, jak ich zdolność do wyrażania szczegółu czy ogólnego przeglądu całości. Sieć przepływu, na przykład, może być uściślona do najmniejszego szczegółu, podczas gdy diagramy stan-przejście mogą być używane tylko dla uzyskania ogólnego przeglądu całości.

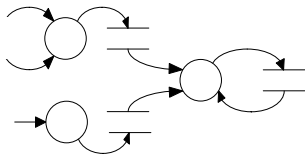
Struktura działań musi zwykle zawierać informacje o instrukcjach oprogramowania, które sterują pracą organów i oczekiwanym zachowaniem się operatora systemu.

6.4.8 Mechatroniczna koncepcja konstrukcyjna

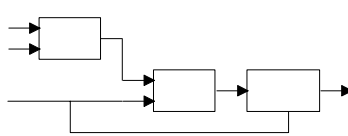
Opierając się na poprzednich punktach jesteśmy w stanie opisać bardziej dokładnie to, co rozumiemy przez *koncepcję konstrukcyjną*. Koncepcja konstrukcyjna jest rozwiązaniem opisanego problemu w sposób umożliwiający ocenę głównych decyzji, które dotyczą zarówno podsystemu mechanicznego, elektronicznego jak i podsystemu oprogramowania. Koncepcję konstrukcyjną systemu mechatronicznego charakteryzują:

Przepływy informacji i danych

Sieć przepływu danych



Analiza strukturalna



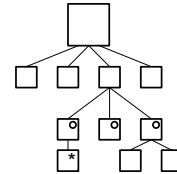
Przepływy mocy i energii

Graf strukturalny (Bond graph)



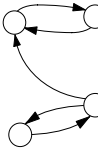
Hierarchia przetwarzania informacji

Wykres Jacksona

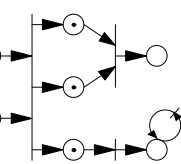


Stany i przejścia

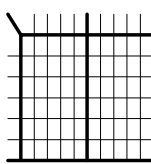
Wykres przejścia stanów



Sieć Petri'ego

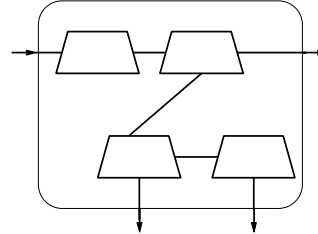


Macierz decyzji



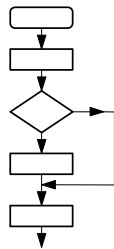
Funkcje celowe

Struktura funkcjonalna

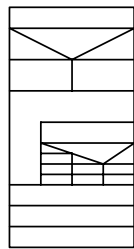


Sekwencje

Sieć przepływu

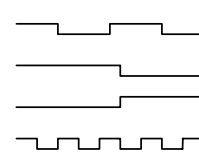


Strukturogram

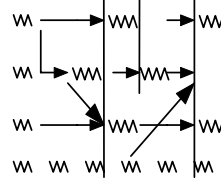


Taktowanie

Wykres taktowania



Rachunek zdarzeń



Źródło: BRADLEY, BUUR1993, BUUR 1995

Rys. 6.23. Narzędzia do opisu logiki zachowania się w organicznej strukturze systemów mechatronicznych

1. Struktura tych organów, które realizują najważniejsze funkcje systemu.
2. Struktura tych organów interfejsowych, które określają granicę systemu (człowiek/maszyna, interfejsy systemowe i środowiskowe) i granice między podsystemami elektronicznymi i mechanicznymi.
3. Struktura działania organów, łącznie z instrukcjami oprogramowaniami dla organów programowalnych i oczekiwanego zachowania się operatora.
4. Podstawowa struktura mechaniczna i rozmieszczenie organów, projekt formy przemysłowej, metody produkcji itd.

Innymi słowy: gdy porównujemy idee konstrukcyjne na wczesnym etapie opracowywania projektu, musimy się upewnić, że są one stosunkowo kompletne, tj. że wszystkie cztery wspomniane wyżej punkty widzenia zostały rozważone do pewnego poziomu.

A jak generować koncepcje konstrukcyjne dla systemów mechatronicznych? Metoda, która zawsze będzie dawać sukces, nie istnieje. Aby dojść do idei celu systemu, musimy raczej eksperymentować na różnych formach opisu funkcjonalnego i następnie szukać realizacji fizykalnych (organów) dla każdej funkcji i odpowiedniej struktury organów. Z powodu złożoności mechatroniki musimy być ostrożni w opisywaniu (modelowaniu) koncepcji konstrukcyjnych na tym samym poziomie kompletności; musimy wszystko porównać w celu znalezienia najlepszej koncepcji. Często sama koncepcja konstrukcyjna nie wystarcza do rozwiązania problemu projektowego. Wtedy musimy się uciec do innych metod, np. do tzw. prototypowania wirtualnego czy szybkiego (rapid prototyping).

6.5 Zdobywanie informacji o procesie

Do opracowania odpowiednich algorytmów sterowania jakimś procesem trzeba znać jego model matematyczny. Chodzi przy tym zarówno o model statycznego jak i dynamicznego zachowania się procesu. Prowadzą do tego dwie drogi:

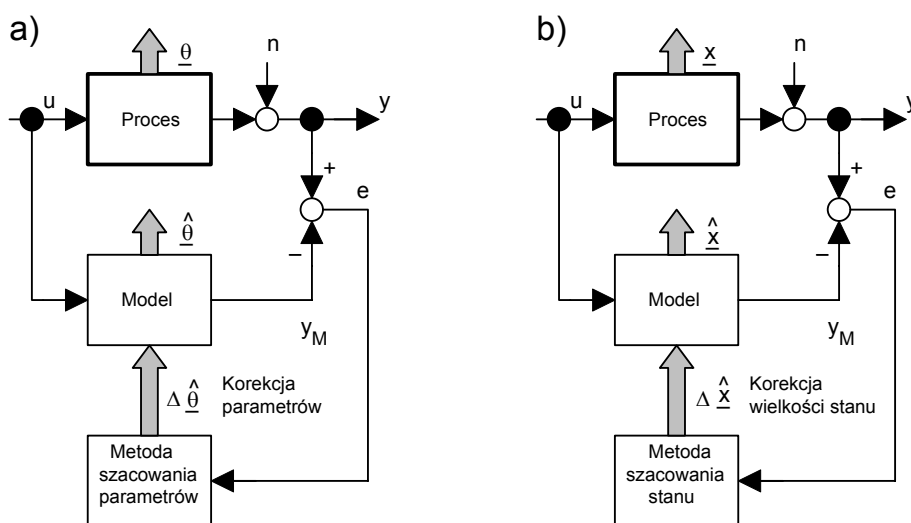
- określenie struktury modelu i niektórych parametrów na drodze *teoretycznej*,
- określenie nieznanymi parametrów na drodze *eksperymentalnej* (identyfikacja, szacowanie parametrów).

Podczas teoretycznego tworzenia modelu ogólnych procesów dynamicznych buduje się najpierw równania bilansu dla energii, masy i impulsu. Następnie wprowadza się fizykalne równania stanu i równania fenomenologiczne. W systemach mechanicznych punktem wyjścia do zbudowania równań podstawowych są przede wszystkim prawa Newtona, zasady d'Alemberta i zasady Lagrange'a [CANNON 1973].

Identyfikacja polega na ustalaniu zależności między układami rzeczywistymi a ich modelami matematycznymi [GIERGIEL, UHL 1990]. Jest to, ogólnie biorąc, sposób ustalania modelu matematycznego procesu na podstawie badań eksperymentalnych.

Ponieważ pomierzone sygnały wejściowe i wyjściowe pozostają w pewnym związku przyczynowym, można z nich otrzymać informacje o wewnętrznym zachowaniu się procesu. Do osiągnięcia tego celu mogą służyć dwie różne metody: szacowanie parametrów i szacowanie stanu.

Metoda szacowania parametrów polega na minimalizowaniu błędu między pomierzonym sygnałem wyjściowym $y(t)$ i sygnałem wyjściowym $y_M(t)$ pewnego pomyślanego, równoległe przyłączonego modelu (rys. 6.24a). Parametry Θ modelu przyjęte jako stałe uzyskuje się przez minimalizowanie sumy błędów kwadratowych, np. za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Dla modeli z sygnałami ciągłymi i dyskretnymi w czasie istnieją wypróbowane algorytmy i moduły oprogramowania w postaci nierekurencyjnej lub rekurencyjnej, także dla powoli zmieniających się parametrów i określonych klas modeli nieliniowych [ISERMANN 1992].



Źródło: ISERMANN 1993

Rys. 6.24. Metody (oparte na modelu) uzyskiwania informacji o procesach dynamicznych: a – szacowanie parametrów; b – szacowanie stanu

Jeżeli znane są parametry Θ , to mogą być określone zmienne w czasie wielkości stanu $X(t)$. Odbywa się to przez tworzenie błędu wyjściowego $e(t)$ przez odpo-

wiednie sprzężenie zwrotne korekcji $\Delta X(t)$ (rys. 6.24b). Dla sygnałów deterministycznych otrzymuje się w ten sposób obserwację wielkości stanu, a dla sygnałów stochastycznych – oszacowanie wielkości stanu (filtr Kalmana). W ten sposób dają się określić niemierzalne zmienne wewnątrzprocesowe.

Wyniki oszacowania parametrów mogą być na przykład wykorzystane dla samonastawiających się regulacji, tłumień lub (opartego na modelu) rozpoznawania uszkodzeń. Oszacowane wielkości stanu są bazą dla stanowych sprzężeń zwrotnych w celu stabilizacji lub regulacji i dla (opartego na modelu) rozpoznawania uszkodzeń za pomocą wielkości stanu.

6.6 Narzędzia projektowania

Zastosowanie komputerów we wszystkich fazach projektowania i konstruowania systemów mechatronicznych jest oczywistością. Oprócz komputerowo wspomaganego konstruowania i wytwarzania systemów mechanicznych wiele korzyści dla syntezy przynosi cyfrowa symulacja całego systemu, składającego się z systemu mechanicznego, sensorów, aktorów i mikrokomputerów. Jest to ważne ze względu na wymagania czasu rzeczywistego dla mikrokomputerów. Chodzi tu głównie o nieliniowe systemy mechaniczne ze stałymi czasowymi w zakresie kilku milisekund. Wskutek symulacji następuje integracja różnych elementów systemu z uwagi na przebieg sygnału w czasie. Warunkiem symulacji systemu mechanicznego jest zbudowanie dynamicznego modelu procesu, opisane w pkt. 6.5. Znane muszą być także modele dynamiczne sensorów i aktorów. Za pomocą tych dynamicznych modeli symulacyjnych dają się wtedy przeprowadzić studia parametrów w celu skomponowania systemu mechanicznego, włączając w to obróbkę informacji w postaci regulacji, adaptacji czy nadzoru. Wchodzi w to także projekt algorytmów obróbki do informacji.

Dla dalszych etapów rozwojowych właściwa jest symulacja typu „Hardware-in-the-loop-Simulation” w następujących postaciach (ISERMANN 1993):

- hardware części mechanicznej i symulacja komputera,
- hardware części komputerowej i symulacja systemu mechanicznego,
- hardware komputer-sensor-aktor i symulacja systemu mechanicznego.

6.7 Przykład tworzenia struktury transformacyjnej systemu mechatronicznego

Obiekty, którymi zajmuje się mechatronika, są z reguły systemami dynamicznymi. Jeżeli na obiekty, którymi zajmuje się budowa maszyn i elektrotechnika, popatrzymy z czysto fenomenologicznego punktu widzenia, tzn. według wyglądu i rodzaju zachodzących w nich zjawisk, to widzimy wyraźne różnice. Przykładami mogą być podstawowe obiekty budowy maszyn i elektrotechniki, a mianowicie układ sprężyna-masa-tłumik i układ kondensator-cewka-opornik.

Jeżeli na te obiekty popatrzymy bardziej systemowo, to różnice znikają. Potraktowanie właściwości systemu dynamicznego nie na podstawie jego wyglądu (budowy fizycznej), ale na podstawie matematycznych właściwości modelu systemu wykazuje zadziwiające podobieństwa. W tym ujęciu każdy system dynamiczny jest czarną skrzynką, w którą wchodzi wielkość wejściowa (przyczyny zmian) a wychodzą wielkości wyjściowe (skutki zmian). Wielkości te mogą być dowolnymi wielkościami fizycznymi, jak siły, ciśnienia, przepływy masy, napięcia elektryczne, prądy elektryczne. System, a właściwie jego struktura transformacyjna od wejścia do wyjścia, jest odwzorowywany przez model matematyczny, czyli przez treść czarnej skrzynki. Model ten składa się z reguły z wielu równań i przynależnych warunków brzegowych.

Poniższy przykład pokazuje jedną z metod tworzenia struktury transformacyjnej urządzenia mechatronicznego [PETRIK, SZĄSZ 1993]. Opisany jest wewnętrzny strumień danych, przekształcenia energetyczne podsystemów, oraz wewnętrzne interfejsy urządzenia. Funkcja całkowita urządzenia opiera się na harmonicznym współdziałaniu podsystemów.

6.7.1 Model fizyczny, model matematyczny, etapy analizy systemu

Na początku istnieje system rzeczywisty jako jedna, oddzielna całość. Należy zdefiniować granicę badanego systemu. W ten sposób możemy odseparować otoczenie od samego systemu. Wpływ środowiska zewnętrznego jest definiowany jako wejście, a odpowiedź systemu – jako wyjście. Aby badać osiągi dynamiczne systemu, należy zbudować odpowiedni model *fizyczny*. Model ten zawiera istotne cechy systemu rzeczywistego, związane z naszym zakresem i zadaniami. Następnym krokiem jest zdefiniowanie *matematycznego* modelu systemu na podstawie modelu fizycznego. Końcowa forma modelu systemu to równanie (równania) systemu. Dopiero wtedy można badać elementy systemu i powiązania między nimi, tj. strukturę systemu.

Matematyczne wyrażenie sterujących relacji między zmiennymi systemu jest nazywane *problemem formułowania*. Elementy łączące nakładają ograniczenia (constraints) na zmienność zmiennych systemu. Wygodną drogą wyszczególnienia tych ograniczeń jest matematyczne wyrażenie sposobu, w jaki zmienne spadku (across-variables) są wzajemnie odnoszone. Następnie równaniami elementarnymi opisane są relacje *zmiennych przepływu* i *zmiennych spadku* dla każdego pojedynczego elementu. Ten pakiet równań jest całkowitym opisem systemu.

Tak więc *etapy modelowania* są następujące:

- analizowanie systemu rzeczywistego jako całości;
- rozpoznawanie punktu widzenia modelowania (tj. zadania);
- precyzowanie granic systemu i podsystemów;
- identyfikacja elementów systemu;
- ustalenie powiązań i zależności między elementami, tj. narysowanie struktury systemu (za pomocą grafów);
- zbudowanie modelu matematycznego;
- rozwiązanie modelu matematycznego dla pożądanego wejścia;
- sprawdzanie poprawności modelu i rozwiązania przez precyzowanie (poprawianie) modelu (jeżeli istnieją nie dające się tolerować różnice między wynikami pomierzonymi i obliczonymi).

Istnieje wiele praktycznych procesów i metod budowania modelu matematycznego. Poniżej pokazujemy *metodę grafów strukturalnych*, jako przydatne narzędzie dla modelowania systemu. Metoda ta daje bardzo dobry wgląd w wewnętrzną strukturę złożonego urządzenia mechatronicznego.

Każdy element systemu wciela się w odpowiednią właściwość (atrybut) części systemu, np. bezwładność, sprężystość, tłumienie, pojemność, indukcyjność itd. Tabela. 6.1 pokazuje zbiór „idealnych” elementów systemu, włączając zasobniki energii, rozpraszacz, źródła i przekształtnik. Są to elementy abstrakcyjne. Reprezentują one właściwości, które chcemy modelować za ich pomocą. Część rzeczywista może zawierać kilka oddzielnych takich czystych elementów, powiązanych w określonej strukturę. Kombinacja elementów idealnych, pomyślana do reprezentowania zachowania systemu rzeczywistego, nazywana jest *modelem systemu*. Stopień, do którego zachowanie się modelu idealnego koresponduje z zachowaniem systemu rzeczywistego reprezentowanego przez model, jest funkcją doświadczenia, ćwiczenia i wiedzy inżynierskiej tego, kto modeluje. Zwykle model jest *kompromi-*

sem między jego złożonością i stopniem dokładności wymaganej w przewidzianym zachowaniu się systemu rzeczywistego.

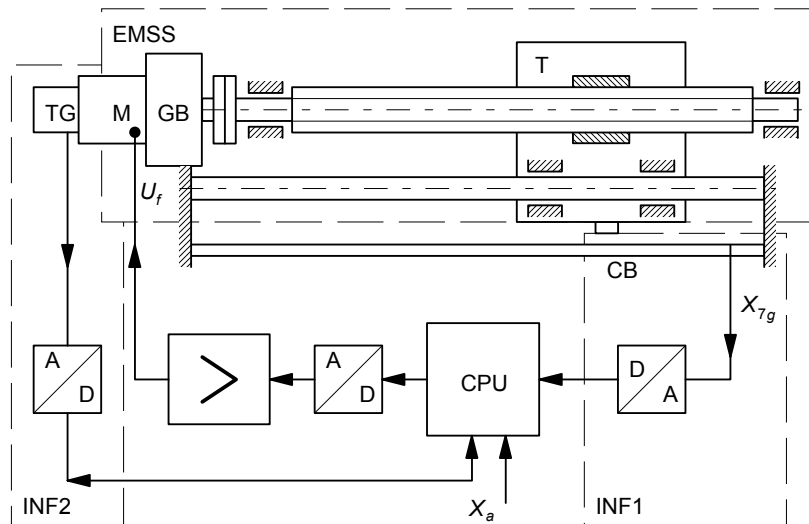
Tabela 6.1. „Idealne” elementy (właściwości) systemu.

Właściwość	Schemat blokowy	Graf	Równanie elementarne	Energia (idealna)
Bez-władność			$F = m \frac{dv_2}{dt}$ $v_2 = \frac{1}{m} \int_0^t F dt + v_0$	$E_m = \frac{1}{2} m v_2^2$
Sprężystość			$F = k \int_0^t (v_2 - v_1) dt + F_0$	$E_p = \frac{1}{2} \frac{F^2}{k}$
Roz-prosze-nie			$F = b(v_2 - v_1)$ $(v_2 - v_1) = \frac{F}{b}$	Moc rozproszona $P = b(v_2 - v_1)^2$
Prze-kształcenie			$\frac{(v_4 - v_3)}{(v_2 - v_1)} = n$ $F_b = \frac{1}{n} F_a$	Bez strat energii
Źródło (zmienna spadku)			$v = v(t)$ $F = \dots \dots \dots$ zależnie od systemu	Teoretycznie nieskończona
Źródło (zmienna przepływu)			$v = \dots$ zależnie od systemu $F = F(t)$	Teoretycznie nieskończona

Źródło: PETRIK, SZÁSZ 1993

6.7.2 Model złożonego systemu elektromechanicznego

Dla ilustracji przedstawionej wyżej techniki modelowania zademonstrujemy model podsystemu elektromechanicznego. Urządzenie to zawiera serwośilnik prądu stałego, reduktor, tachogenerator przyłączony do wału serwośilnika oraz stół, napędzany mechanizmem śrubowym z prowadnicą prostoliniową. Szkic urządzenia pokazuje rys. 6.25, a graf strukturalny systemu rys. 6.26 (bez tachogeneratora).



Źródło: PETRIK, SZÁSZ 1993

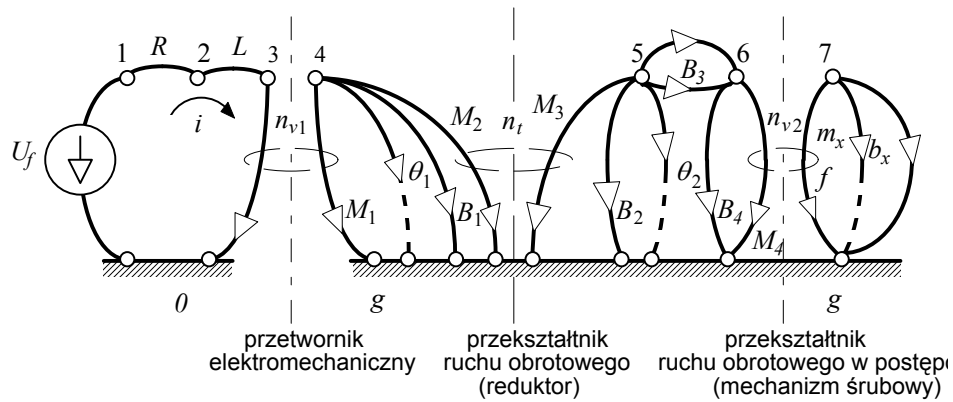
Rys. 6.25. Schemat urządzenia mechatronicznego: EMSS – podsystem elektromechaniczny; TG – tachogenerator; M – silnik elektryczny; GB – reduktor; T – stół; U_f – napięcie wejściowe; CB – kod kreskowy przetwornika położenia; X_{7g} – zmienność położenia; CPU – komputer; A/D – przetwornik analogowo-cyfrowy; INF1, INF2 – podsystemy informacyjne 1. i 2

Równania systemu, oparte na grafie strukturalnym, są następujące:

Elektryczna część silnika

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{\omega_{4g}}{n_{v1}} = U_f, \quad (6.1)$$

gdzie: U_f – napięcie wejściowe, R , L – opór i indukcyjność silnika, ω_{4g} – prędkość kątowa silnika, n_{v1} – współczynnik przetwarzania, i – wartość prądu w silniku.



Źródło: PETRIK, SZĄSZ 1993

Rys. 6.26. Graf strukturalny systemu (bez tachogeneratora)

Równanie przetwornika elektromechanicznego (silnika):

$$\begin{aligned}\omega_{4g} &= n_{v1} U_{30}, \\ M_1 &= -\frac{i}{n_{v1}},\end{aligned}\quad (6.2)$$

gdzie: M_1 – moment na wale silnika.

Dla przekształtnika ruchu obrotowego (reduktora) mamy:

$$\begin{aligned}\omega_{5g} &= n_1 \omega_{4g}, \\ M_3 &= -\frac{M_2}{n_t},\end{aligned}\quad (6.3)$$

gdzie: M_2 – moment na wale wejściowym reduktora, M_3 – moment na wale wyjściowym reduktora, n_t – przełożenie reduktora.

Równanie dla przekształtnika ruchu obrotowego w postępowy (mechanizmu śrubowego):

$$\begin{aligned}w_{7g} &= n_{v2} \omega_{6g}, \\ f &= -\frac{M_4}{n_{v2}},\end{aligned}\quad (6.4)$$

gdzie: w_{7g} – prędkość stołu (suportu), M_4 – moment na śrubie, f – siła wzdłużna w śrubie, M_3 – moment na wale wyjściowym reduktora, n_{v2} – przełożenie mechanizmu śrubowego.

Równanie dla części mechanicznej stołu ruchomego ma postać:

$$\frac{dM_k}{dt} = K \left(n_t \omega_{4g} - \frac{w_{7g}}{n_{v2}} \right), \quad (6.5)$$

gdzie: M_k – moment w sprężynie, K – sztywność skrętna sprężyny, n_t – przełożenie reduktora, ω_{4g} – prędkość kątowa wałka wyjściowego reduktora.

Równania współdziałających podsystemów mają stąd postać:

$$m_x \frac{dw_{7g}}{dt} = \frac{1}{n_{v2}} \left(M_k + n_t B_3 w_{4g} \right) - \left[\left(B_3 + B_4 \right) \frac{1}{n_{v2}^2} + b_x \right] w_{7g}, \quad (6.6)$$

$$\left(\frac{\theta_1}{n_t} + n_t \theta_2 \right) \frac{d\omega_{4g}}{dt} + \left[\frac{B_1}{n_t} + n_t (B_2 + B_3) \right] \omega_{4g} + M_k = \frac{i}{n_t n_v} + \frac{B_3}{n_{v2}} w_{7g}, \quad (6.7)$$

gdzie: m_x – masa stołu, w_{7g} – prędkość stołu, M_k – moment w obracającej się sprężynie, B_3, B_4 – współczynniki dysypacji śruby i łożyskowania mechanizmu, b_x – współczynnik dysypacji przewodnicy ślizgowej, θ_1 – bezwładność wirnika serwosilnika, θ_2 – bezwładność śruby mechanizmu, ω_{4g} – prędkość kątowa serwosilnika, B_1, B_2 – współczynnik dysypacji łożysk serwosilnika i reduktora.

Stan systemu będzie definiowany przez wektor stanu; przez zmienne stanu, którymi są:

$$\underline{X} \triangleq \begin{bmatrix} \omega_{4g} \\ w_{7g} \\ M_k \\ i \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Na podstawie równań 1-6 budowany jest *model przestrzeni stanów* tego podsystemu. Obliczana jest *transmitancja* dla przypadku, gdy wyjściem jest przemieszczenie stołu przewodnicowego (X_{7g}). Kolejnymi etapami są: *zaprojektowanie odpo-*

wiedniego sterownika i symulacja jako narzędzie projektowania i analizy systemu. Opis tych etapów można znaleźć w [PETRIK, SZĄSZ 1993].

6.8 Podsumowanie

Kluczową cechą projektowania mechatronicznego jest jego zintegrowanie z punktu widzenia różnych obszarów technicznych: inżynierii mechanicznej, techniki komputerowej, mikroelektroniki i systemów czasu rzeczywistego. Najważniejszą zaletą takiej koncepcji jest elastyczność, zarówno procesu rozwojowego jak i produktu finalnego. Zintegrowane konstruowanie jest najlepszą drogą optymalizowania sposobu realizacji funkcji częściowej.

Podczas projektowania i konstruowania systemów mechatronicznych wymagane jest współdziałanie dyscyplin mechanicznych (budowy maszyn, mechaniki precyzyjnej, mechaniki technicznej), elektrycznych (mikroelektroniki, elektroniki siłowej, sensoryki, techniki pomiarów, akustyki) i informatycznych (teorii systemów, techniki automatyzacji, projektowania oprogramowania, sztucznej inteligencji). Projektowanie mechatroniczne pomaga realizować produkty, których realizacja byłaby trudna lub nawet niemożliwa za pomocą klasycznego projektowania mechanicznego lub elektronicznego.

Upowszechnianie rozwiązań mechatronicznych wymaga *nowej koncepcji działalności projektowej i konstruktorskiej*. Chodzi w niej nie tylko o wspólną płaszczyznę porozumienia między specjalistami z różnych dziedzin, ale także o sposoby zintegrowania specjalistycznej wiedzy elektronicznej i informatycznej z klasyczną budową maszyn [GAWRYSIĄK 1993]. Płaszczyznę porozumienia się specjalistów może tu być metodyka projektowania i konstruowania.

Modele odgrywają ważną rolę w procesie projektowania i konstruowania inżynierskiego. Skuteczne modele projektowania i konstruowania mechatronicznego nie jest jednak łatwo opracować. Wynika to z samej natury mechatroniki – potrzeby integracji różnych technik i stąd interakcji między tymi technikami. Multi-dyscyplinarna i multitechniczna natura mechatroniki stwarza inżynierowi problem racjonalnego rozłożenia funkcji na różne techniki. Dotyczy to zwłaszcza umiejętności porównywania i wybierania różnych rozwiązań technicznych.

7. Zakończenie

Budowa maszyn podlega radykalnym przemianom. Trafnie istotę tych przemian ujął AUSLANDER [1993] redukując funkcję układu mechanicznego do dostarczania energii, a resztę pozostawiając technice komputerowej. Być może jest to zbyt duże uproszczenie, ale faktem jest, że jakość i wydajność nowoczesnych maszyn zależą przede wszystkim od układów sterowania, a właściwie od systemów informacyjnych. Nowoczesne maszyny powstają z klocków, modułów funkcjonalnych, które, tak jak komórki, tworzą organizm, całość, system. Klockami tymi nie są jednak, jak dotychczas, tylko klasyczne mechanizmy, ale także systemy informacyjne. Maszyna jest napędzana nie tylko energią, ale także informacją. Systemy informacyjne opasują i przenikają maszynę. Klasyczna technika mechaniczna jest wiązana z informatyką, proces roboczy w maszynie jest ciągle optymalizowany, regulacja strumienia materiału i energii następuje szybko i bezpośrednio. Całość działa jak organizm w skoncentrowanej akcji. Do budowy takiej maszyny potrzeba w takim samym stopniu Specjalistów jak i Generalistów, ponieważ zbiegają się tu różne dyscypliny techniczne: mechanika stosowana z budową maszyn i technologią mechaniczną, planowanie z konstruowaniem, elektrotechnika i elektronika z napędami i znowu mechaniką, a właściwie już z mechatroniką – powiązaniem mechaniki z elektromechaniką, elektroniką i nadrzędnym nad tym wszystkim sterowaniem komputerowym.

Fantastyczny wprost rozwój techniki mikroprocesorowej rzuca wyzwanie budowie maszyn. W maszynach mamy coraz więcej elementów elektronicznych i informatycznych. Pojęcia automatyki i robotyki kojarzone są dziś zwykle z mikroelektroniką i techniką komputerową. Pojawiają się poglądy, że to, co dotychczas realizowano za pomocą dźwigni, kół zębatach, sprężyn i innych elementów mechanicznych, wkrótce zostanie zrealizowane za pomocą mikroprocesorów. Czy aby na pewno? Czy klasyczna, mechaniczna teoria maszyn i mechanizmów skazana jest na stopniowe wymieranie? Czy zastąpi ją może mechatronika [GAWRYSIAK 1996]?

Tego rodzaju poglądy i wątpliwości skłaniają mechaników do rozmyślań i stawiania pytań podstawowych: Jak należy dziś rozumieć pojęcie maszyny? Czy jest to jeszcze urządzenie głównie mechaniczne? Jak będą wyglądać maszyny w XXI wieku? Czy mechatronika jest naturalnym etapem rozwoju dotychczasowej teorii maszyn i mechanizmów czy teorią całkowicie nową? Jak powinno wyglądać kształcenie nowoczesnych inżynierów budowy maszyn?

Mechatronika, jak to pokazaliśmy, zawiera w sobie wiedzę kilku tradycyjnych dyscyplin inżynierskich. Tym, co tę różnorodną wiedzę racjonalnie jednoczy

w procesie konstruowania urządzenia mechatronicznego, jest ogólna metodyka konstruowania – dyscyplina niewiele starsza od mechatroniki. Metodyka konstruowania, przez swą uniwersalność, jest traktowana jako filozofia konstruowania produktów technicznych. W tym kontekście mechatronika może być także traktowana jako swego rodzaju filozofia – filozofia konstruowania nowoczesnych urządzeń i procesów technicznych.

Najbardziej charakterystyczna cecha mechatroniki jest opisywana przez pojęcie synergii. Synergia, jak to trafnie i dowcipnie ujmuje HEWIT [1996], jest „tym, co otrzymujesz, gdy wybierzesz poprawny zestaw składników potrawy i ugotujesz je razem poprawnie. Rezultat jest czymś znacznie więcej niż tylko sumą składników. Pojawia się coś charakterystycznego, wyjątkowego. W sensie inżynierskim to, co może się pojawić, jest nowym i dotychczas nieosiągalnym zestawem charakterystyk urządzenia.”

W coraz bogatszej literaturze mechatronika jest często traktowana jako synergiczna integracja różnych technik, przede wszystkim inżynierii mechanicznej, techniki mikroprocesorowej i techniki komputerowej. Jednak wskutek różnorodności zastosowań mechatronika jest różnie rozumiana przez ludzi o różnym wykształceniu i różnych specjalnościach. Dla jednych mechatronika to komputerowo wspomagane projektowanie i wytwarzanie za pomocą robotów przemysłowych, czyli koncepcja zintegrowanej inżynierii. Inni widzą mechatronikę jako technikę interfejsowania, towarzyszącą automatycznemu sterowaniu dowolnych procesów czy hierarchicznie sterowanej jednostce. Inżynier, zatrudniony w produkcji, może widzieć mechatronikę jako wdrożenie elastycznego systemu wytwarzania, zaś konstruktor urządzenia wideo może myśleć o mechatronice jako o elektronice z małym odchyleniem w kierunku zastosowań mechanicznych. Wszystkie te postrzeżenia mechatroniki są w zasadzie poprawne. Nić wspólnoty leży w zastosowaniu technik opartych na komputerowym sterowaniu cyfrowym, przez różnorodne interfejsy elektryczne i elektroniczne, do skutecznego operowania wielością funkcji mechanicznych.

Udany produkt mechatroniczny trudno jest skonstruować jednej osobie; jest on po prostu zbyt złożony. Tak samo trudno jest to zrobić zespołowi osób o różnych specjalnościach, dopóki osoby te nie znajdą wspólnej płaszczyzny porozumienia. Tą płaszczyzną porozumienia jest zwykle struktura funkcjonalna projektowanego urządzenia.

W dotychczasowej praktyce produkt o funkcjach mechanicznych, zawierający czujniki i sterowanie elektroniczne, był konstruowany sekwencyjnie. Najpierw struktura mechaniczna była konstruowana i wytwarzana przez inżynierów mechaników. Następnie zajęciem inżynierów elektroników było wyposażenie tej struktury

ry w odpowiednie przetworniki i urządzenia wykonawcze. Na koniec inżynierowie automatycy próbowali znaleźć skuteczne struktury sterowników i algorytmów sterowania. Istnieje wiele uderzających przykładów katastrofalnych skutków takiej filozofii konstruowania, szczególnie gdy produkt jest bardzo złożony [HEWIT 1996].

Istotą mechatroniki jest więc harmonijna integracja różnych technik. Rolę integratora pełni tu metodyka (technika) konstruowania. W tak rozumianej filozofii mechatroniki nie znajdujemy właściwie nic nowego w stosunku do dotychczasowej filozofii konstruowania poza włączeniem techniki mikroprocesorowej (komputerowej). To, co oferuje mechatronika, jest jednak nową okazją do skupienia się na tym, co skutecznie łączy rozchodzące się interesy inżynierów mechaników i elektryków.

Z interdyscyplinarności mechatroniki wynika potrzeba współpracy różnych dyscyplin w nauce, badaniach i edukacji inżynierów. Dyscypliny te bowiem ciągle jeszcze tworzą oddzielne, zamknięte obszary. Przyczyny tego oddzielenia są z jednej strony historyczne, z drugiej zaś wywołane szybkim rozwojem elektrotechniki i elektroniki. Wiele wyrobów przemysłu budowy maszyn ma dziś tak dużo elementów elektrycznych i elektronicznych, że potrzeba współpracy między budową maszyn i elektrotechniką staje się coraz bardziej widoczna.

Dotychczasowa edukacja inżynierów tradycyjnie opiera się na pojedynczych dyscyplinach i na podejściu „z dołu do góry”. Buduje na podstawowych zasadach i pojęciach poszczególnych dyscyplin i rozwija je w izolacji od innych przedmiotów. Z nadejściem nowych technologii konieczne staje się systemowe podejście do konstruowania. Rozważa ono raczej ogólne cele niż poszczególne elementy i bardziej podkreśla to, co podsystem i składniki mogą robić niż to, z czego się składają. Ta postawa systemowa w łączeniu różnych technologii tworzy podejście „z góry do dołu”, co sprzyja kształtowaniu rozwiązań optymalnych produktu. Filozofia mechatroniki jest właśnie synonimem takiego podejścia.

8. Literatura

- AUSLANDER, D. M.: The Computer as Liberator: The Rise of Mechanical System Control. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 115, June 1993, pp. 234-238.
- BRADLEY, D., DAWSON, D., BURD, N., LOADER A.: *Mechatronics. Electronics in products and processes*. Chapman & Hall, London 1991.
- BRADLEY, D.A., BUUR, J.: The representation of mechatronic systems. Proc. of ICED 93, WDK 18, pp. 37-44, 1993.
- BRANOWSKI B.: Koszty w projektowaniu współbieżnym. Materiały XVII Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, tom Referaty Problemowe, s. 15-26. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1995.
- BUUR, J.: *Mechatronics Design in Japan*. Technical University of Denmark, Institute for Engineering Design, IK publication 89.58 A. Lyngby 1989 (a).
- BUUR, J.: „A Framework for Mechatronics Design Methodology” *Proc. of ICED 89*, WDK 18, pp. 507-518, 1989 (b).
- BUUR, J.: A theoretical approach to mechatronic design. Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby 1990.
- BUUR, J.: Design models and method for mechatronics. In *Mechatronic Design in Textile Engineering*, (Edited by Acar M.), NATO ASI Series E: Applied Sciences, Volume 279, pp. 33-46. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1995.
- CANNON, R. H.: *Dynamika układów fizycznych*. WNT Warszawa 1973.
- EICKMEIER, A.: Ein Bauteil denkt mit. *Antriebstechnik* 33 (1994) Nr. 12, s. 3- 4.
- ESCAP. Motion Systems. Katalog firmy Portescap.
- FELDERMANN, J.: Mechatronik in der Praxis – Lösung konstruktiver Probleme mit mechatronischen Konzepten. *Konstruktion* 47 (1995), pp. 102-104.
- FRASER, C., MILNE, J.: *Integrated electrical and electronic engineering for mechanical engineers*. McGraw-Hill, London 1994.
- GAWRYSIAK M.: Kształcenie konstruktorów maszyn. *Przegląd Mechaniczny*, 1993, Nr 5-6, s. 3-5.
- GAWRYSIAK M.: Napęd mechatroniczny. *Przegląd Mechaniczny* 1995, Nr 13, s. 7-10 (a).
- GAWRYSIAK M.: Mechatronika – naturalny etap rozwoju maszyn czy nowa filozofia konstruowania. *Materiały XVII Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn*, tom Referaty Problemowe, s. 51-63. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1995 (b).

- GAWRYSIAK M.: Mechatronika – nowa teoria maszyn? *Materiały XV Ogólnopolskiej Konferencji Teorii Maszyn i Mechanizmów*. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 1996, s. 7-16.
- GIERGIEL J., UHL T.: *Identyfikacja układów mechanicznych*. PWN Warszawa 1990.
- GREGORY, G.: *Japanese electronics technology: enterprise and innovation*. John Wiley & Sons, 1986.
- HANSON, M.: Teaching Mechatronics at Tertiary Level. *Mechatronics* Vol. 4, No. 2, pp. 217-225, 1994.
- GARDNER, J.W.: *Microsensors*, J. Wiley & Sons 1994.
- HEINRICH, H.: Schalten wird immer komfortabler. *VDI-nachrichten* 1994, Nr. 33.
- HEINZL, J.: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. *Landtechnik* 40(1985), Nr. 1, s. 13-17.
- HENGSTLER. Drehgeber-Programm 1993/94. Katalog firmy.
- HEWIT, J. R.: Mechatronics. In *Mechatronic Design in Textile Engineering*, (Edited by Acar M.), NATO ASI Series E: Applied Sciences, Volume 279, pp. 1-26. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht 1995.
- HEWIT, J. R.: Mechatronics design – The key to performance enhancement. *Robotics and Autonomous Systems* 19 (1996) pp. 135-142.
- HUNT, V. D.: *Mechatronics: Japan's Newest Threat*. Chapman & Hall, London 1988.
- IRDAC: Opinion on R&D needs in the field of mechatronics. Industry R&D Advisory Comitee of the Commisssion of the European Communities, Bruxelles 1986.
- ISERMANN, R.: *Identifikation dynamischer Systeme*. Springer-Verlag 1992.
- ISERMANN, R.: Integrierte mechanisch-elektronische Systeme. *VDI-Z* 135(1993), Nr. 10, s. 64-69.
- ISERMANN, R., RAAB, U.: Intelligent Actuators – Ways to Autonomous Actuating Systems. *Automatica*. Vol. 29. (1993) No. 5, pp. 1315-1331.
- ISERMANN, R.: Information processing for mechatronic systems. *Robotics and Autonomous Systems* 19 (1996) pp. 117-134.
- ISHII, T.: Mechatronics and Japanese society. in MCLean, M.: *Mechatronics developments in Japan and Europe*. Technova, Quorum Books, London 1983.
- ISII, T., SIMOJAMA, I., INOUE, H., HIROSE, M., NAKADZIMA, N. *Mechatronika*. Pervod s japonskogo. Moskva, Mir 1988.
- JANOCHA, H. (Hrsg): *Aktoren. Grundlagen und Anwendungen*, Springer-Verlag 1992.

- KAJITANI, M.: Advanced information society and mechatronics. Literatura w BUUR 1989(a).
- KING, T.: Millwrights to mechatronics: the merits of multi-disciplinary engineering. *Mechatronics* Vol. 5, No 2/3, pp. 95-115, 1995.
- KING, T. G. and YANG, S.: Tension compensation for fixed delivery cone winding: a mechatronic approach. In *Mechatronic Design in Textile Engineering*, (Edited by Acar M.), NATO ASI Series E: Applied Sciences, Volume 279, pp. 179-190. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht 1995.
- LINKE, A.: „Intelligenter Flansch” als Drehimpulsgeber. *Antriebstechnik* 33(1994) Nr. 12, s. 31-32.
- MECHATRONICS: Mechanics, Electronics, Control. An International Journal. Aims and Scope 1995.
- MIKROMA. Resolwery. Katalog firmy.
- MIU, D. K.: *Mechatronics. Electromechanics and Contromechanics*, Springer-Verlag 1993.
- MLaP: Mechatronischer Systembaukasten für die industrielle Praxis. Auszüge anwendungsbezogener Forschung für Industrie und Wirtschaft. Informationsblätter 1, 2 und 5. Mechatronik Laboratorium Paderborn 1993.
- PAHL, G., BEITZ, W.: *Nauka konstruowania*. WNT Warszawa 1984.
- PAWLICKI G.: Mechatronika na przykładzie Wydziału Mechaniki Precyzyjnej PW. Materiały Konferencyjne „Mechatronika 92”, PW, 2, 1992.
- PETERS, K.: Elektronischer Synchronlauf ersetzt mechanische Bewegungskopplung. *VDI-Z Special Antriebstechnik*, März 1995, S. 54-63.
- PETRIK, O., SZÁSZ, G. The inside structure model of mechatronic devices, *Mechatronics*, Vol.3, No. 2, pp. 127-138, 1993.
- PRESTON, M. E.: Mechatronics. The new design integrator. Proceedings of SEFITALI 1989 annual conference, pp. 263-268, Naples, Italy 1989.
- PRESTON, M.E. and EDWARDS, C.L. "Marketing, Management and Mechatronics" Proc. of ICED 93, WDK 22, pp. 719-722, The Hague, 1993.
- RAAB, U., ISERMANN, R.: Digitale Regelung und Überwachung von Kraftfahrzeugaktoren. *ATZ* 95(1993) 2, S. 90-96
- RODDECK, W.: *Einführung in die Mechatronik*. Teubner, Stuttgart 1997.
- SCHNELL, G. (Hrsg.): *Sensoren in der Automatisierungstechnik*. Vieweg, Braunschweig 1993.

SCHWEITZER, G.: Mechatronik-Aufgaben und Lösungen. *VDI-Ber.* Nr. 787, S. 1-15, Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.

STADLER, W.: *Analytical robotics and mechatronics*. McGraw-Hill 1995.

STIFFLER, A. K. *Design with microprocessors for mechanical engineers*. McGraw-Hill 1992.

TRYLIŃSKI W.: Mechatronika. *PAK* 1987/11, s. 245-247.

T+R ELECTRONIC. GmbH Absolut-Encoder Baureihe: CE, CH, AE. Katalog firmy.

VENUVINOD, P. K. et al.: Development of the First Mechatronic Engineering Degree Course in the Far East. *Mechatronics* Vol. 3, No. 5, pp. 537-541, 1993.

WIKANDER, J.: Mechatronic essentials. Advanced Control, Real -Time Performance and Function Partitioning. *Proceedings of International Conference Mechatronics & Robotics*, pp. 197-210. Europäisches Centrum für Mechatronik, Aachen 1994.