

MECHATRONIKA

1. WPROWADZENIA i POJĘCIA PODSTAWOWE

- Podstawowe pojęcia mechatroniki
- Przykłady urządzeń mechatronicznych
- Analiza procesowa systemów mechatronicznych
- Tworzenie modeli i pojecie funkcji w mechatronice
- Projektowanie systemów mechatronicznych.

PODSTAWOWE POJĘCIA Z MECHATRONIKI

Pojęcie mechatroniki (ang. *mechatronics*) powstało przed około trzydziestu laty w związku z rozwojem techniki robotycznej w Japonii.

Składa się ono z dwóch części: mechaniki i elektroniki. Oznaczało ono wtedy zastosowanie mikroprocesorów do sterowania maszynami.

Dziś ze słowem tym kojarzy się nauka inżynierska, której celem jest poprawa funkcjonalności systemu technicznego przez ścisłe powiązanie komponentów mechanicznych, elektronicznych i technik informatycznych.

Produkty mechatroniczne charakteryzują się przede wszystkim tym, że ich funkcje można zrealizować tylko przez współdziałanie tych komponentów.

W produktach mechatronicznych występuje przemieszczenie funkcji, na przykład z dziedziny mechaniki czy z budowy maszyn w kierunku elektroniki i przetwarzania informacji.

Postępowanie takie pozwala znajdować nowe rozwiązania, bardzo korzystne z punktu widzenia charakterystyk i kosztów. Przykłady produktów mechatronicznych można spotkać w technice samochodowej, technice automatyzacji, technice medycznej, czy przemyśle rozrywkowym.

Krótkie wyliczenie pozwala domyślać się złożoności wyrobów mechatronicznych które charakteryzują się dużym stopniem integracji komponentów z całkowicie różnych dziedzin czy specjalności.

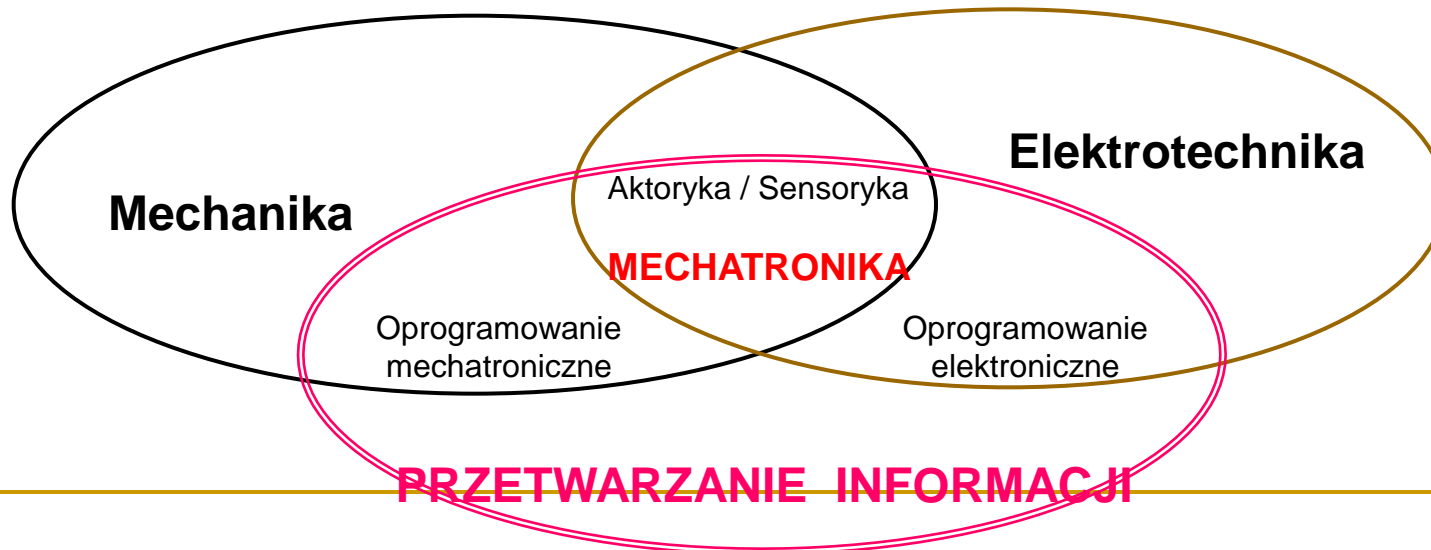
-
- Według definicji podanej przez **Międzynarodową Federację Teorii Maszyn i Mechanizmów**
 -
 - mechatronika jest synergiczną kombinacją mechaniki, elektronicznego sterowania i systemowego myślenia przy projektowaniu produktów i procesów produkcyjnych.
 -
 - Podobne merytorycznie definicje pojęcia mechatronika podają inne organizacje i instytucje naukowe, techniczne i normalizacyjne, w tym także **Komisja Doradcza Unii Europejskiej ds. Badawczo-Rozwojowych**.

Pojęcie "mechatronika" (ang. *mechatronics*) tworzą dwa słowa - mechanika i elektronika. Powstało ono w 1969 roku w japońskiej firmie *Yaskawa Electric Corporation* i jest od 1971 roku chronione przez tę firmę jako nazwa handlowa.

Pierwotnie przez mechatronikę rozumiano uzupełnienie komponentów mechanicznych przez elektronikę w mechanice precyzyjnej. Typowym tego przykładem jest rozwój nowoczesnych lustrzankowych aparatów fotograficznych, magnetofonów itd.

Dziś mechatroniką określa się naukę inżynierską, która opiera się na klasycznych dyscyplinach budowy maszyn, elektrotechniki i informatyki.

Celem tej nauki jest poprawianie funkcjonalności systemów technicznych przez powiązanie tych dyscyplin.



Samo słowo „mechatronika”^[1] jest zbitką dwóch słów: **mechaniki** i **elektroniki**. Oznacza to w praktyce, że nadal, jak w typowym systemie mechanicznym, głównymi **wielkościami sterowanymi lub regulowanymi** (wielkościami wyjściowymi) **systemu mechatronicznego** mogą być m.in.:

- położenie, prędkość i przyspieszenie w ruchu liniowym lub obrotowym,
 - siła i moment obrotowy związane z realizacją ruchu lub będące jego skutkiem,
 - ciśnienie i wynikający z niego przepływ cieczy lub gazu,
 - częstotliwość drgań mechanicznych, także akustycznych i optycznych,
 - temperatura i wywołana nią wymiana (unoszenie) ciepła,
 - ruch obszarów cieczy i gazów (płynów) pod wpływem czynników zewnętrznych,
 - prąd elektryczny wywołujący ruch elementów mechanicznych w polu magnetycznym,
- czyli przede wszystkim wielkości mechaniczne lub elektromechaniczne, związane z ogólnie rozumianym ruchem, siłą lub momentem.

Oznacza to także, że główna różnica pomiędzy systemem mechanicznym i mechatronicznym polega na zmianie wielkości sterującej lub zadającej (wielkości wejściowej lub nastawczej):
w pierwszym przypadku są to wielkości mechaniczne lub elektromechaniczne,
w drugim - takie wielkości, jak napięcie i natężenie prądu elektrycznego oraz inne wielkości elektryczne związane z dwoma wymienionymi.

urządzenia i maszyny mechatroniczne różnią się od innych urządzeń i maszyn mechanicznych lub elektromechanicznych, o identycznym przeznaczeniu lub zasadzie działania, wyposażeniem w zintegrowany, programowany sterownik mikroprocesorowy.

Po raz pierwszy terminem „mechatroniczny” nazwano sterownik elektroniczny silnika elektrycznego, opracowany w 1971 r. w japońskiej firmie Yaskawa Electric Corporation i nazwę tę chroniono znakiem handlowym aż do 1982 r. Już więc od samego początku stosowania tego słowa łączono je z wprowadzaniem sterowania elektronicznego do systemu mechanicznego i elektromechanicznego. W Polsce pojęcie mechatroniki upowszechnił w latach 80. profesor Władysław Tryliński z Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej. Wydział ten - jako pierwszy w polskich uczelniach technicznych i jako jeden z pierwszych w Europie - przyjął w 1996 r. nazwę Wydziału Mechatroniki. Spolszczone nieco przez profesora słowo „mechanotronika” nie przyjęło się.

Zob. W. Tryliński: Mechatronika w: „Pomiary. Automatyka. Kontrola”, 1987, nr 11 s. 245-247

Do najbardziej istotnych cech systemu mechatronicznego, w porównaniu do rozwiązania mechanicznego, należy zaliczyć:

•**Zmniejszenie liczby i zakresu działania elementów i zespołów mechanicznych systemu.**

Zasadność cechy: rozwiązania mechaniczne są drogie, zawodne, wymagające ciągłego nadzoru, konserwacji i obsługi, zarówno w trakcie uruchomienia, jak i podczas normalnej eksploatacji systemu,

•**Wprowadzenie elektronicznych układów automatycznego sterowania i regulacji parametrów systemu, rozwiązujących problemy prowadzenia, koordynacji, nadzoru i optymalizacji procesów realizowanych przez system.**

Zasadność cechy: ingerencja operatora-człowieka w system jest kosztowna, jej efektywność podlega silnym okresowym wahaniom związanym z fizjologiczną gotowością człowieka do wykonywania pracy, prowadzi do obciążeń fizycznych i psychicznych, których skutkiem są wypadki i awarie systemu,

•**Wykorzystanie w możliwie największym zakresie niematerialnych możliwości kształtowania właściwości systemu.**

Zasadność cechy: pozostawienie materialnych - mechanicznych elementów i zespołów kształtujących właściwości systemu ogranicza możliwości ich zmiany, wymiany lub optymalizacji. Oprogramowanie, będące właśnie niematerialnym elementem systemu mechatronicznego, w połączeniu z konsekwentnym zastosowaniem komputerowego przetwarzania i przesyłania danych procesowych, zapewnia działanie systemu bez potrzeby ingerencji w elementy i zespoły mechaniczne,

•**Dążenie do wykorzystania i ścisłej współpracy w systemie elementów i zespołów o różnych zasadach działania, pochodzących z różnych dziedzin techniki.**

Zasadność cechy: podejście systemowe pozwala, dzięki niekonwencjonalnemu ujęciu problemu doboru i integracji elementów systemu, na uzyskanie w systemie bądź nowych, bądź bardziej korzystnych charakterystyk i właściwości, niż będzie to miało miejsce w przypadku ograniczenia się do rozwiązań jednorodnych technicznie.



W **fonografii**, wynalezionym przez Tomasza Edisona w 1877 r., jednym z pierwszych urządzeń do zapisywania i odtwarzania dźwięku, przytwierdzona do membrany igła, ślizgając się po powierzchni walca pokrytego warstwą wosku, żłobiła w niej rowek o głębokości zmieniającej się w takt drgań membrany - ta sama bambusowa lub metalowa igła, przenosząc drgania z wyłobionego rowka na membranę, pozwalała na odtworzenie dźwięku. Było to więc wyłącznie urządzenie mechaniczne, podobne do starszych, bo już znanych w XVIII wieku, mechanizmów grających zegarów, katarynek i pianoli.

z gr. *phono* = dźwięk, głos, *graphein* = skrobać, rysować
Thomas Alva Edison (1847-1931) – Wynalazca amerykański, twórca ponad 1000 patentów z zakresu elektrotechniki

Całkowicie mechanicznymi urządzeniami były także pierwsze **gramofony** z płaską płytą i zapisem w bocznym wynalezionym przez Emila Berlinera w 1879 r. oraz **patefony** z zapisem wgłębnym opracowane i produkowane do lat 20. ubiegłego stulecia przez Karola i Emila Pathe. Oprócz płaskiej płyty istotnym postępem było wprowadzenie w **gramofonach mechanicznych** napędu sprężynowego z mechanicznym regulatorem prędkości obrotowej (jako standard przyjęto wtedy 78 obr/min), ruchomego ramienia z osadzoną igłą oraz przede wszystkim wzmocnienia odtwarzanego dźwięku przez ramię w postaci rury i tubę lub pudło rezonansowe.

z gr. *gramma* = zapis, *phono* = dźwięk, głos

Emil Berliner (1851-1929) – inżynier amerykański pochodzenia niemieckiego

Charles (1863-1957) i Emil (1860-1937) Pathe – bracia, przemysłowcy francuscy, pionierzy europejskiej fonografii – stąd powszechna w XX wieku nazwa **patefon**

Adapter – gramofon elektryczny z lat 50. ubiegłego wieku



Po 1920 r. pojawiają się pierwsze **gramofony elektryczne**, w których napęd mechaniczny płyty zastąpiono napędem elektrycznym oraz, dziesięć lat później, tubę i pudło rezonansowe - głośnikiem i lampowym wzmacniaczem elektronicznym. Wzmacniacz współpracował z umieszczonym na końcu ramienia tzw. **adapterem**^[1] (stąd kolejna, dość mylna nazwa gramofonów elektrycznych, będącym w istocie przetwornikiem mechanicznych drgań igły na sygnał elektryczny. W latach 50. XX wieku upowszechniają się wzmacniacze tranzystorowe, igły szafirowe, korundowe i nawet diamentowe oraz ustala się kolejny standard obrotów płyty ((i 45 obr/min). W 1958 r. pojawiają się pierwsze gramofony stereofoniczne.

Magnetofon szpulowy z lat 60. ubiegłego wieku



Przenośny magnetofon kasetowy – przełom lat 80. i 90. XX wieku



Zaledwie piętnaście lat po pojawieniu się pierwszych gramofonów elektrycznych, w 1935 r. w Berlinie, na Wystawie Radiotechnicznej pokazano kolejne nowe urządzenie fonograficzne opatentowane pod nazwą **magnetofonu**. Odegra ono kolosalną rolę nie tylko w dziedzinie zapisu i odtwarzania dźwięku, ale także w rozwoju techniki programowalnego sterowania w automatyce i robotyce oraz techniki komputerowej i pomiarowej. Taśma magnetyczna okaże się doskonałym - w zasadzie do czasów nam współczesnych - nośnikiem zapisywanych na niej informacji, zarówno fonicznych, wizyjnych (**magnetowid**), jak i tworzących procedury sterowania innymi maszynami i urządzeniami. **Magnetofon szpulowy** od 1963 r. i **magnetofon kasetowy** wykorzystują jeszcze dość złożone mechanicznie zespoły napędowe taśmy (współcześnie z prędkością 4,76 cm/s w przyrządach kasetowych) i zespoły sterujące jej ruchem - pozostałe zespoły są już wyłącznie elektryczne, magnetyczne i elektroniczne.

Niem. Magnetophon = magnetofon

Przenośny gramofon cyfrowy

– odtwarzacz CD z ostatniej dekady ubiegłego wieku

W 1982 r. dokonany zostaje w dziedzinie fonografii kolejny krok w kierunku mechatroniki - zaprezentowany zostaje pierwszy **gramofon cyfrowy** (tzw. **odtwarzacz CD**^[1] lub rzadziej **dyskofon**). W gramofonie wykorzystywany jest jako nośnik informacji krążek - płyta (nazywany powszechnie dyskiem) z przezroczystego tworzywa sztucznego (grubość 1,2 mm i średnica 12 cm, także 8 cm i inne) o metalizowanej powierzchni, w której wytworzone zostały wgłębienia o różnej długości i w różnych odstępach, co pozwala przy pomocy odbijającego się od ścieżki zapisu promienia laserowego i fotodiod odczytujących wytworzyć ciąg sygnałów optycznych przetwarzanych na elektryczny sygnał cyfrowy i następnie analogowy, kierowany do wzmacniacza akustycznego. Tu już tylko sam dysk, rotor (wirnik) obracającego go silnika elektrycznego oraz laserowy zespół odczytowy (bądź współcześnie także zapisowy) są ruchomymi elementami mechanicznymi (liniowa prędkość odczytu i zapisu wynosi przeważnie 1,25 m/s). Pozostałe zespoły są wykonane jako układy cyfrowe. Zespoły elektroniczne sterują prędkością obrotową silnika, utrzymują plamkę promienia lasera na ścieżce odtwarzania i zapisu, dokonują korekcji błędów i redukcji szumów, przetwarzają cyfrową postać sygnału na postać analogową, wzmacniają sygnał i sterują programem odtwarzania lub zapisu. Płyta CD, opracowana przez firmę Philips początkowo tylko dla zapisu dźwięku stereofonicznego wysokiej jakości, podobnie jak wcześniej taśma magnetyczna, zrewolucjonizowała nie tylko procesy zapisu fonii, ale także obrazu i wizji oraz - a może przede wszystkim - procesy tworzenia nośników baz danych i programów w technice komputerowej oraz w technice programowalnego sterowania maszynami i urządzeniami.



[1] CD (ang. Compact Disc) = płyta kompaktowa, nazywana także płytą laserową lub optyczną

Odtwarzacz z pamięcią błyskową początku XXI wieku



Ostatnie lata to już dominacja **odtwarzaczy z pamięcią flash**^[1] (nazywanych powszechnie **ipodami** lub **odtwarzaczami plików mp3** - w rzeczywistości stosowane są jeszcze inne metody kompresji plików, np *atrac*). W tych odtwarzaczach nie ma już w ogóle elementów mechanicznych lub elektromechanicznych wprawiających w ruch nośnik informacji - elementy mechaniczne zostały zredukowane do korpusu obudowy odtwarzacza oraz dotykowych sensorów sterujących jego pracą. Sama pamięć flash, podobnie jak to było z pamięciami taśmowymi i płytowymi, wykorzystywana jest już jako wygodny nośnik informacji w technice komputerowej (nazywany tu potocznie **pendrive'm**^[2]).

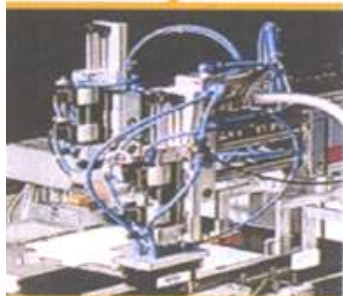
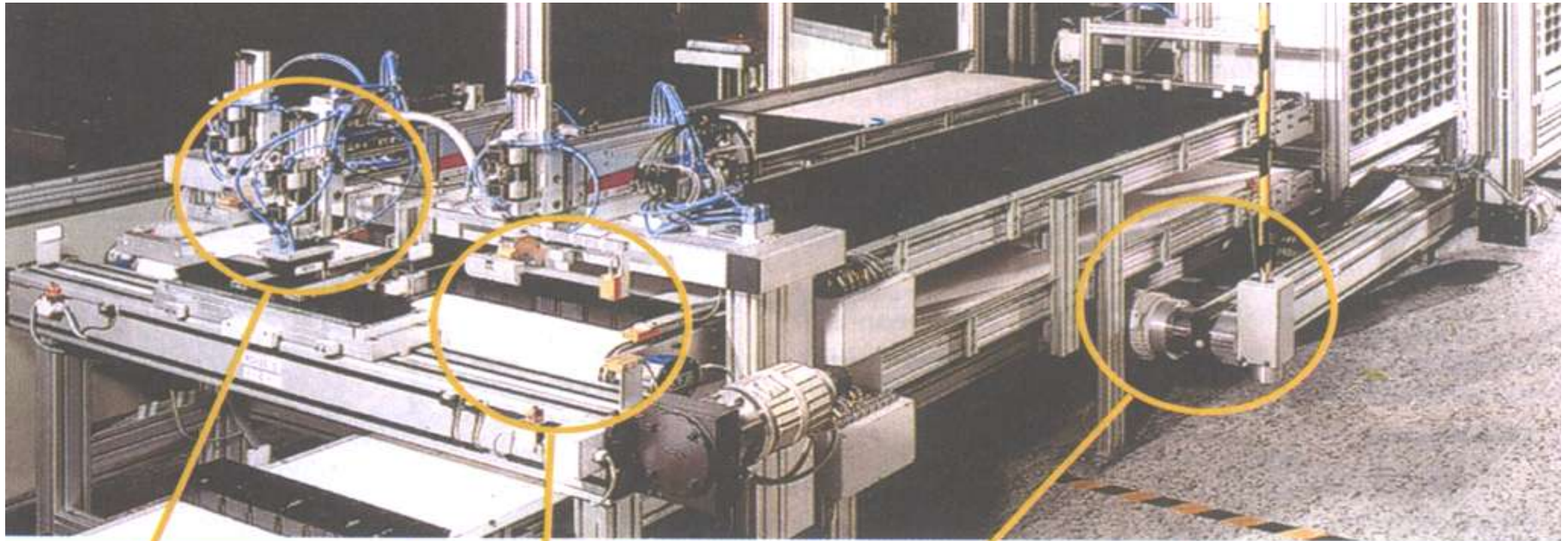
^[1] Ang. flash memory = pamięć błyskowa

^[2] Z ang. pen = pióro, driver = napęd

Synergia w systemie mechatronicznym

Optymalizację zachowania urządzenia, maszyny lub ogólnie systemu mechanicznego, która jest głównym celem działań inżynierskich nazywanych **mechatronizacją**, osiąga się przez połączenie zespołów elektrycznych, elektronicznych i komputerowych z zespołami mechanicznymi w nowy, powiązany sprzętowo i sygnałowo, system mechatroniczny. Ten zintegrowany fizycznie system odbiera za pomocą **sensorów (czujników i przetworników pomiarowych)** sygnały ze **środowiska roboczego (otoczenia)** oraz sygnały wytwarzane przez własne zespoły, przetwarza je i interpretuje we własnym **procesorze (sterowniku, układzie sterowania)** i następnie - odpowiednio do stanu środowiska i własnych zachowań - reaguje na nie przy pomocy **aktuatorów (elementów i urządzeń wykonawczych)**, działając - w sposób zgodny z celem użytkowania systemu - na środowisko.

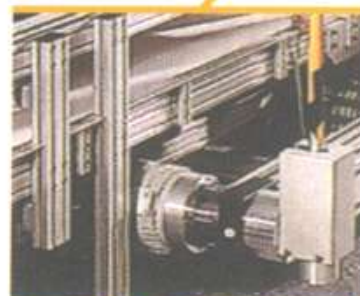
**Przykład systemu mechatronycznego:
współczesne stanowisko produkcyjne**



**Aktuatory
pneumatyczne**



**Sensory
elektroniczne**



**Aktuatory
elektryczne**



**Sterownik
komputerowy**

-
- Pierwszą, istotną cechą systemu mechatronicznego jest więc zintegrowanie sensorów z realizowanym przez system procesem. Procesy te, a więc i pobierana przez sensory **informacja (dane procesowe)**, mogą mieć bardzo różną postać fizyczną: mechaniczną, elektryczną, pneumatyczną, hydrauliczną, także optyczną, chemiczną, a nawet biologiczną oraz różny charakter: **ciągły (analogowy) i nieciągły (przerywany, dyskretny)** w czasie. Sensory powinny zapewnić możliwie wierne przetworzenie tej informacji w ujednolicone sygnały elektryczne, akceptowane przez własną (lokalną) sieć linii przesyłowych oraz przez procesor systemu.
 -
 - Ze względu na cyfrowy sposób przetwarzania tych sygnałów w układzie sterowania tą ujednoliconą postacią sygnałów powinna być również postać cyfrowa.

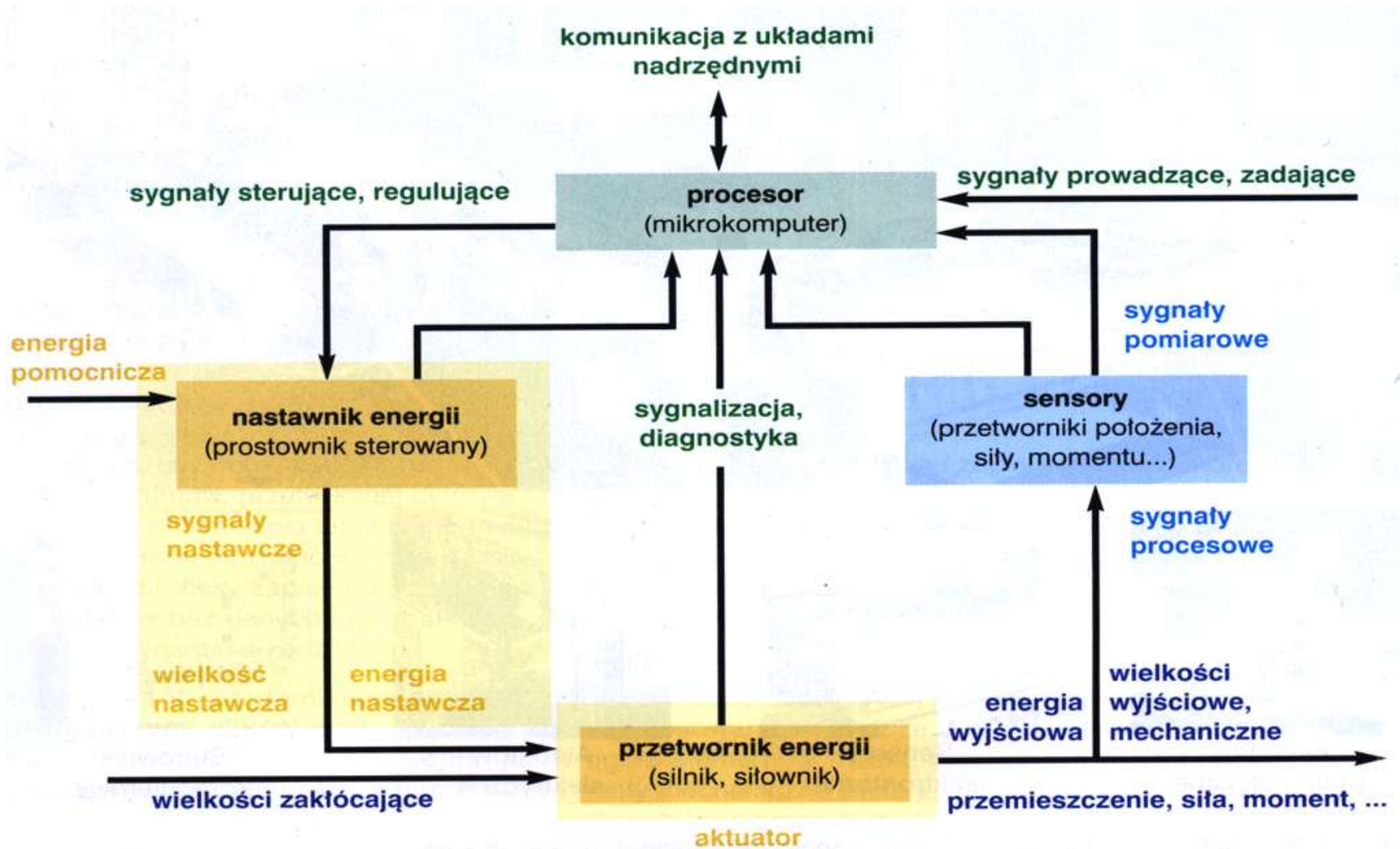
Kolejne zadanie systemu mechatronicznego, jakim jest **przetwarzanie i interpretowanie zebranych przez sensory informacji procesowych**, powinno charakteryzować się trzema głównymi cechami:

- działaniem w czasie rzeczywistym, a więc z możliwie najmniejszymi opóźnieniami pomiędzy zaistnieniem nowej sytuacji procesowej i reakcją na tę sytuację,
- realizacją programową przetwarzania zapewniającą wspomnianą niematerialną zdolność kształtowania właściwości i zachowań systemu mechatronicznego,
- osiągnięciem takiego stopnia inteligencji przetwarzania, który pozwala na przejście przez system mechatroniczny od jego użytkownika przynajmniej części odpowiedzialności za realizację przewidzianych zadań.

Generalnie wyróżnia się **trzy poziomy zadań przewidzianych dla procesora systemu mechatronicznego:**

- sterowanie i regulacja wielkości procesowych - jest to tzw. najniższa lub dolna warstwa działania,
- kontrola wartości granicznych, meldowanie sytuacji awaryjnych, zapewnienie działania lub zatrzymanie pracy systemu w przypadku pojawienia się wybranych uszkodzeń,
- nadzór i diagnoza uszkodzeń, koordynacja systemów cząstkowych w systemach złożonych, zarządzanie systemami złożonymi - i jest to tzw. najwyższy lub górny poziom działania.

Schemat budowy warstwy działań sterujących i regulacyjnych systemu mechatronicznego na przykładzie elektromechanicznego układu napędowego

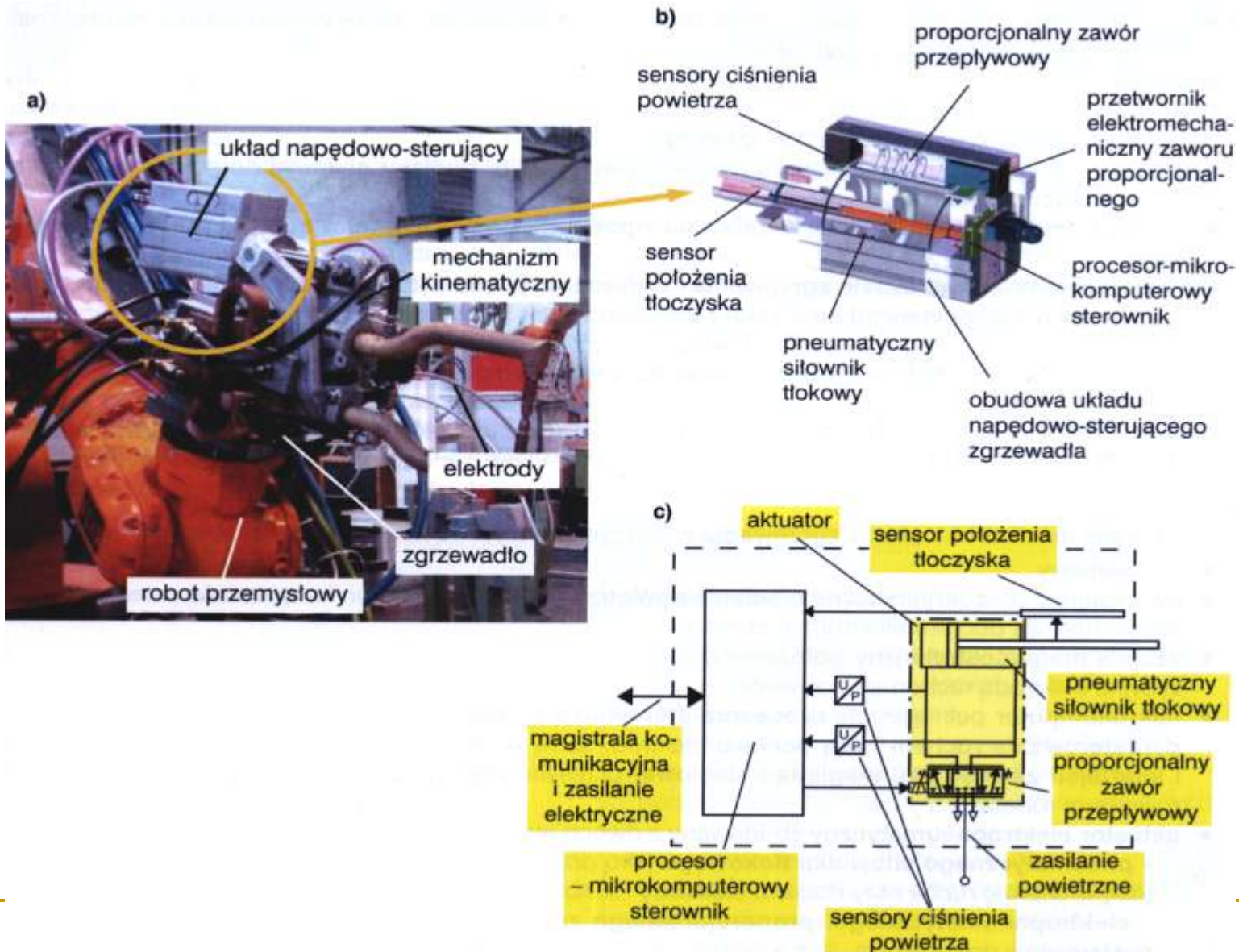


Inną cechą systemu mechatronicznego jest, podobnie jak w przypadku sensorów, zintegrowanie aktuatorów z realizowanym przez system procesem. Tu także ponowne zbliżenie się do wielkości procesowych skutkuje koniecznością wyboru różnych zasad działania elementów i urządzeń wykonawczych oraz różnych sposobów ich działania w czasie (działania ciągłe, przerywne itd.).

Jednocześnie działania wykonawcze wymagają w zdecydowanej większości procesów:

- wzmocnienia energetycznego sygnałów, a więc podania energii pomocniczej, najczęściej w postaci elektrycznej, pneumatycznej lub hydraulicznej,
- przetworzenia elektrycznych sygnałów cyfrowych procesora na akceptowaną przez dany aktuator postać (analogową, cyfrową, binarną) i wielkość fizyczną sygnału (prąd, ciśnienie, przepływ itd.),
- dobrej jakości przetworzenia sygnałów wejściowych aktuatora na sygnały procesowe - może to wymagać potraktowania urządzenia wykonawczego jako cząstkowego systemu (lub podsystemu) mechatronicznego z własnymi sensorami, procesorem i aktuatorami.

Mechatroniczne zgrzewadło blach stosowane w zrobotyzowanej linii montażu karoserii samochodowych: a) zgrzewadło zamontowane na robocie przemysłowym, b) przekrój budowy oraz c) schemat budowy mechatronicznego układu napędowego zgrzewadła



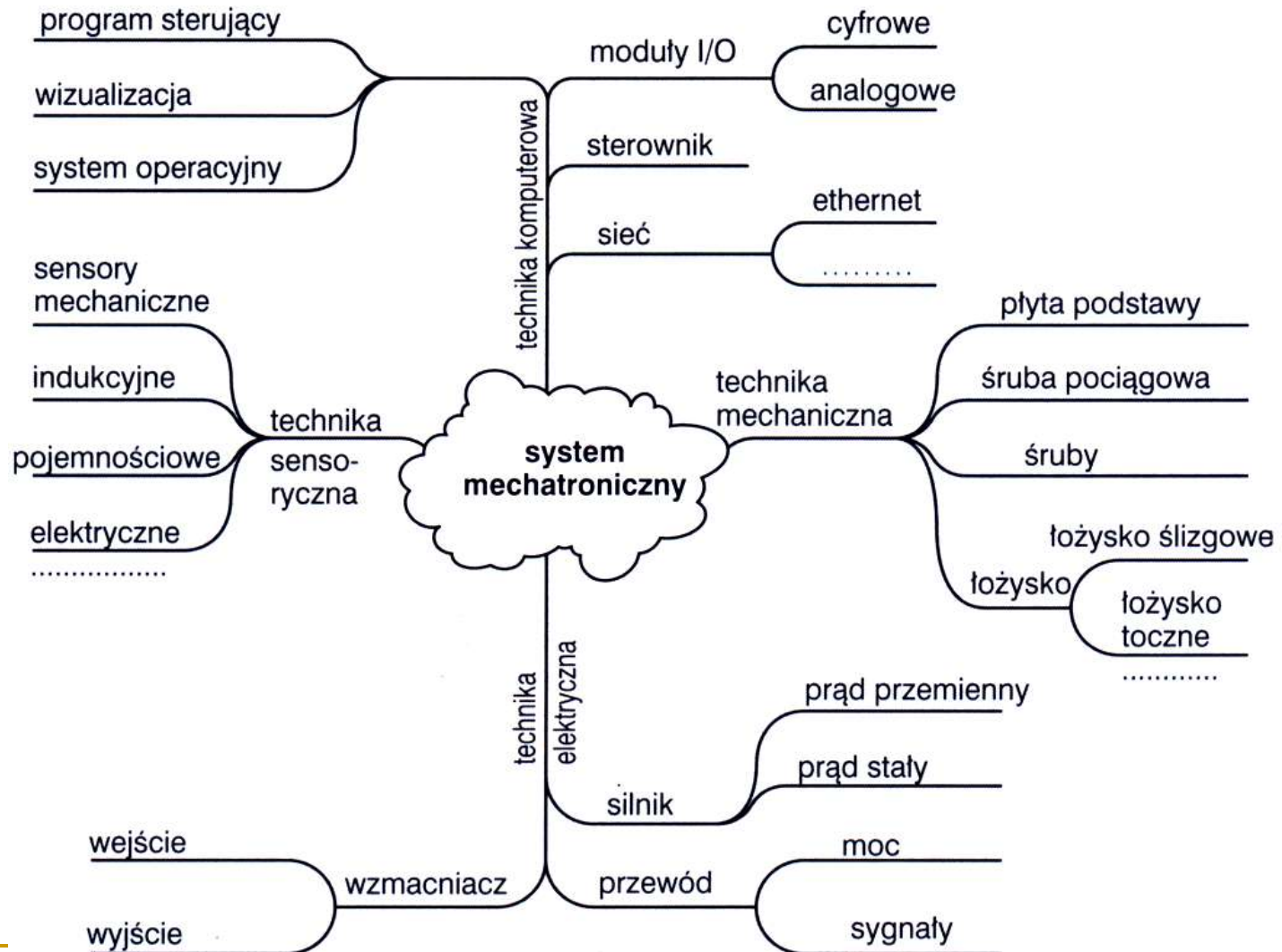
- **Proces zgrzewania przebiega zgodnie z następującą programowaną procedurą:**
- aktuator zgrzewadła przemieszcza elektrody w pobliże powierzchni zgrzewanych blach z możliwie największą prędkością ruchu (**ruch jałowy**),
- aktuator dosuwa elektrody do powierzchni zgrzewanych blach z tak nastawianą prędkością, aby w chwili ich zetknięcia się z łączonymi blachami prędkość była równa zero - zapobiega to uderzeniu elektrod i odkształceniu blach (**ruch roboczy**),
- aktuator rozwija - zgodnie z przyjętą charakterystyką - **siłę docisku elektrod** do powierzchni zgrzewanych blach,
- po osiągnięciu zadanej siły docisku procesor zgrzewadła wysyła **sygnał włączenia prądu zgrzewającego**,
- po zaprogramowanym **czasie zgrzewania i wyłączeniu prądu** aktuator **odsuwa elektrody** z możliwie największą prędkością ruchu od punktu zgrzewania (ruch jałowy),
- po zajęciu pozycji wycofania elektrod procesor zgrzewadła wysyła **sygnał zakończenia procesu** do układu sterowania robotem - robot przemieszcza zgrzewadło do kolejnego punktu zgrzewania.
-
- Ten - mechatroniczny, automatycznie sterowany - sposób zgrzewania gwarantuje najwyższą jakość i doskonały wygląd zgrzeiny przy jednocześnie zdecydowanie krótszym czasie cyklu w porównaniu ze zgrzewaniem konwencjonalnym.

W budowie mechatronicznego zgrzewadła wykorzystano:

- trzy **sensory**,
- dwa **czujniki piezokrystaliczne ciśnienia** powietrza w komorach siłownika aktuatora, pozwalające na sterowanie siłą docisku elektrody ruchomej,
- czujnik magnetostrykcyjny położenia** tłoczyska siłownika aktuatora, pozwalający na sterowanie pozycje elektrodą ruchomą zgrzewadła,
- mikrokomputer** pełniący rolę **procesora-sterownika** zgrzewadła zapewniający, oprócz realizacji **zadań sterowania ruchem i siłą docisku elektrod**, także zadania **interfejsu sieci lokalnej** zgrzewadła i **interfejsu zewnętrznej magistrali sieciowej** przesyłającej sygnały współpracy z nadrzędnym sterownikiem robota,

- aktuator elektropneumatyczny** zbudowany z dwóch elementów:
 - **pneumatycznego siłownika tłokowego** jako przetwornika energii pomocniczej (sprężone powietrze) w energię ruchu i siły docisku elektrody ruchomej zgrzewadła,
 - **elektropneumatycznego, proporcjonalnego zaworu przepływowego** jako nastawnika energii dostarczanej do siłownika,
- dźwigniowy mechanizm kinematyczny** przekształcający ruch liniowy tłoczyska siłownika aktuatora w ruch kątowy elektrod.

Mapa poglądowa projektu mechatronicznego układu napędowego



Do charakterystycznych dla rozwiązania mechatronicznego, **synergicznych cech zgrzewadła** zaliczyć należy

zintegrowane działania sensoryczne - konstrukcyjne połączenie czujników sensorów ciśnienia z kanałami wyjściowymi zaworu proporcjonalnego i połączenie czujnika położenia z tłoczyskiem siłownika,

wyposażenie zgrzewadła we własny **wewnętrzny system komunikacyjny** optymalizujący przesyłanie sygnałów z sensorów do procesora i z procesora do przetwornika elektromechanicznego-zaworu proporcjonalnego,

zintegrowane z sensorami i aktuatorem działanie procesorowe zastosowanego mikrokomputera zapewniające:

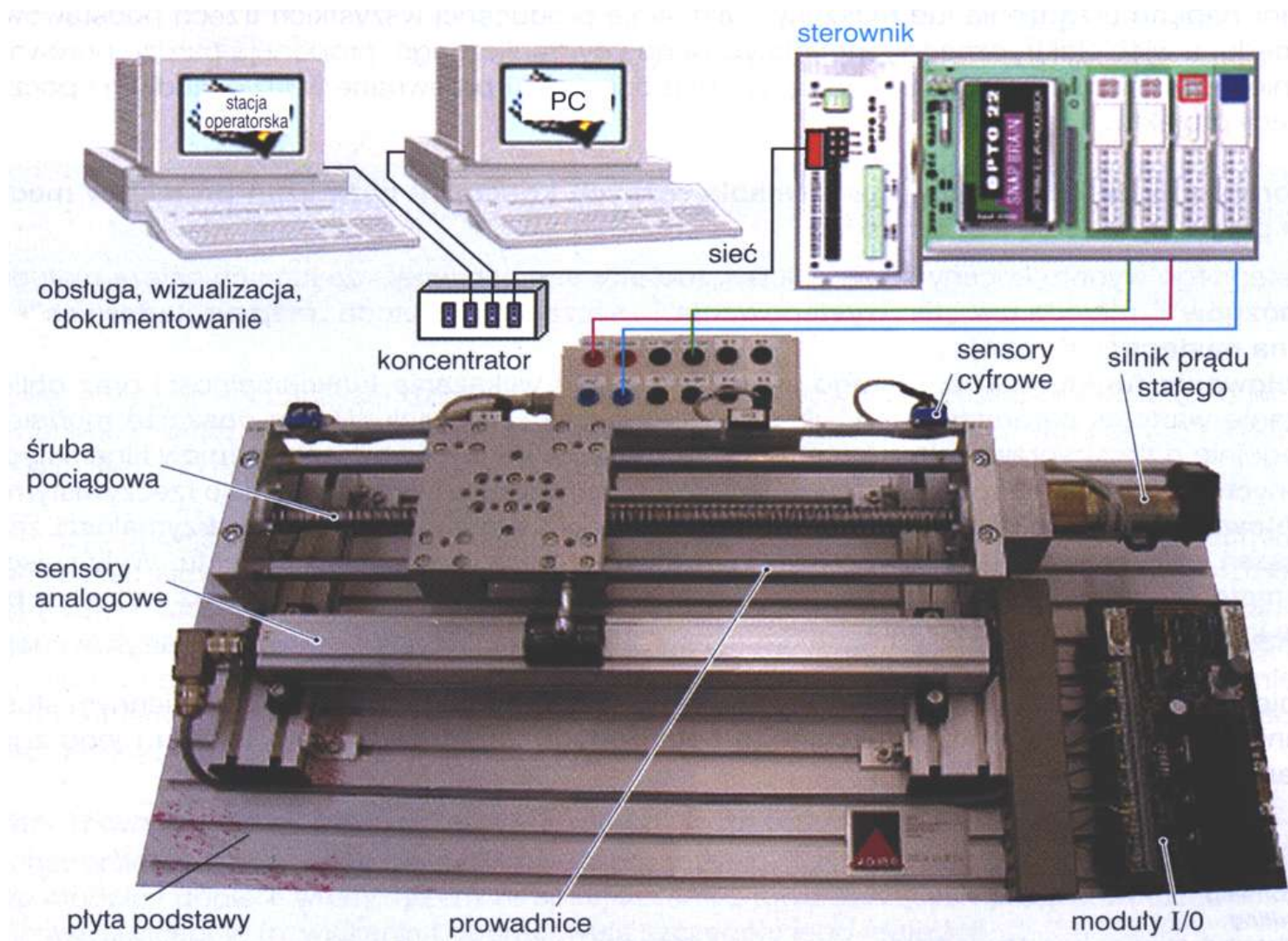
- **programową realizację dwóch procedur sterowania: ruchu i siły docisku elektrod,**
- **komunikację przez zewnętrzną magistralę sieciową** z nadrzędnym układem sterowania,
- **diagnostykę** działania sensorów i aktuatora zgrzewadła,
- konstrukcyjną **integrację płyt obwodów elektronicznych mikrokomputera** z mechanicznymi elementami aktuatora,

zintegrowane działania mechaniczne - konstrukcyjne połączenie nastawnika energii - zaworu proporcjonalnego z przetwornikiem energii - siłownikiem tłokowym oraz połączenie tłoczyska siłownika mechanizmem kinematycznym z elektrodami zgrzewadła,

zamknięcie aktuatora, sensorów i procesora-sterownika we wspólnym korpusie

serwojednostki napędowo-sterującej zgrzewadła, umożliwiające w przypadku awarii łatwą i szybką wymianę całego zespołu.

Przykład rozwiązania układu napędowego stanowiska badawczego





Niekiedy mechatronikę definiuje się jako synergiczną kombinację inżyniersko-mechaniczną, elektryczną i techniczno-informatyczną, służącą do zintegrowanego projektowania inteligentnych systemów, w szczególności mechanizmów i maszyn.

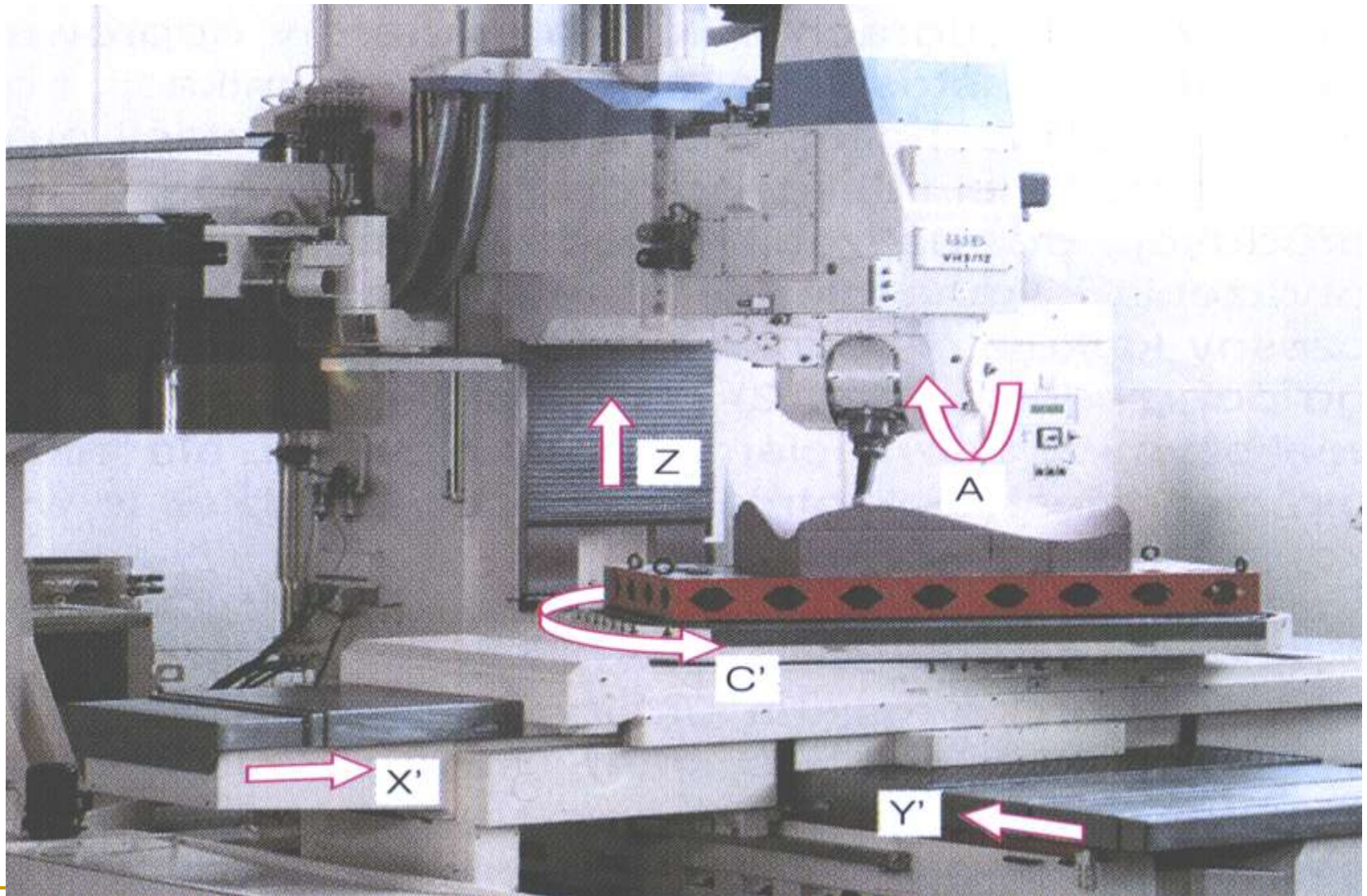
Te różne podejścia do mechatroniki mają dwie cechy wspólne: ujęcie systemowe i zastosowanie metod sterowania do operowania różnymi funkcjami za pomocą różnych interfejsów elektrycznych. Ujęcie systemowe charakteryzuje się przede wszystkim wysokim stopniem integracji, objawiając się synergią efektu integracji, czyli tym, że końcowy produkt jest czymś więcej niż tylko prostą sumą części mechanicznych i elektrycznych.

Mechatronika pokazuje, w jaki sposób można zintegrować klasyczne urządzenie mechaniczne ze sterowaniami mikroprocesorowymi.

System lub układ mechatroniczny jest w stanie za pomocą sensorów (czujników) odbierać ze swojego otoczenia sygnały, przetwarzać je za pomocą mikroprocesora i na tej podstawie, zgodnie z otrzymaną informacją, reagować - posługując się elementami wykonawczymi (aktorami) - odpowiednio do sytuacji. Dzięki temu powstaje system lub układ elastyczny, który może być zastosowany do różnorodnych zadań, czyli urządzenie programowalne, zawierające systemy mechaniczne z sensorami, aktorami i komunikacją.

Współczesna pięcioosiowa frezarka NC

– doskonały przykład maszyny mechatronicznej



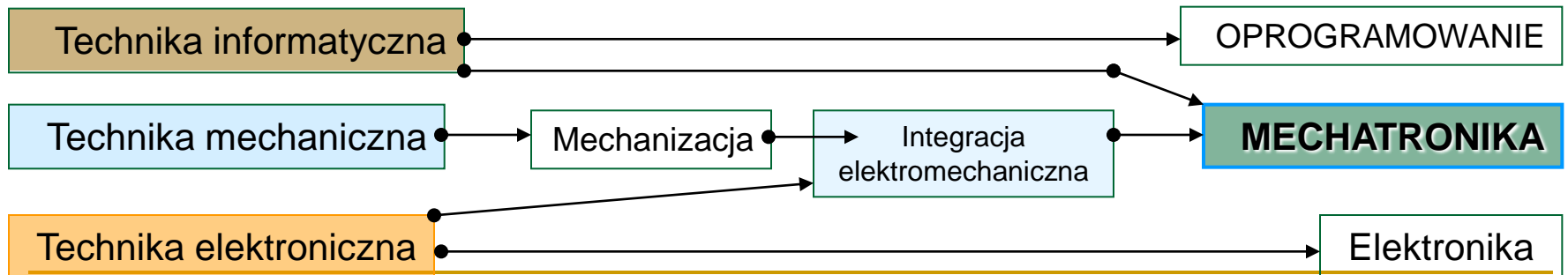
Roboty przemysłowe- typowy produkt mechatroniki – tu zastosowane do robotyzacji linii produkcyjnej samochodów osobowych



Podstawowym celem mechatroniki jest optymalne sterowanie ruchem urządzeń mechanicznych, co osiąga się przez podział urządzenia na moduły realizujące funkcje częściowe.

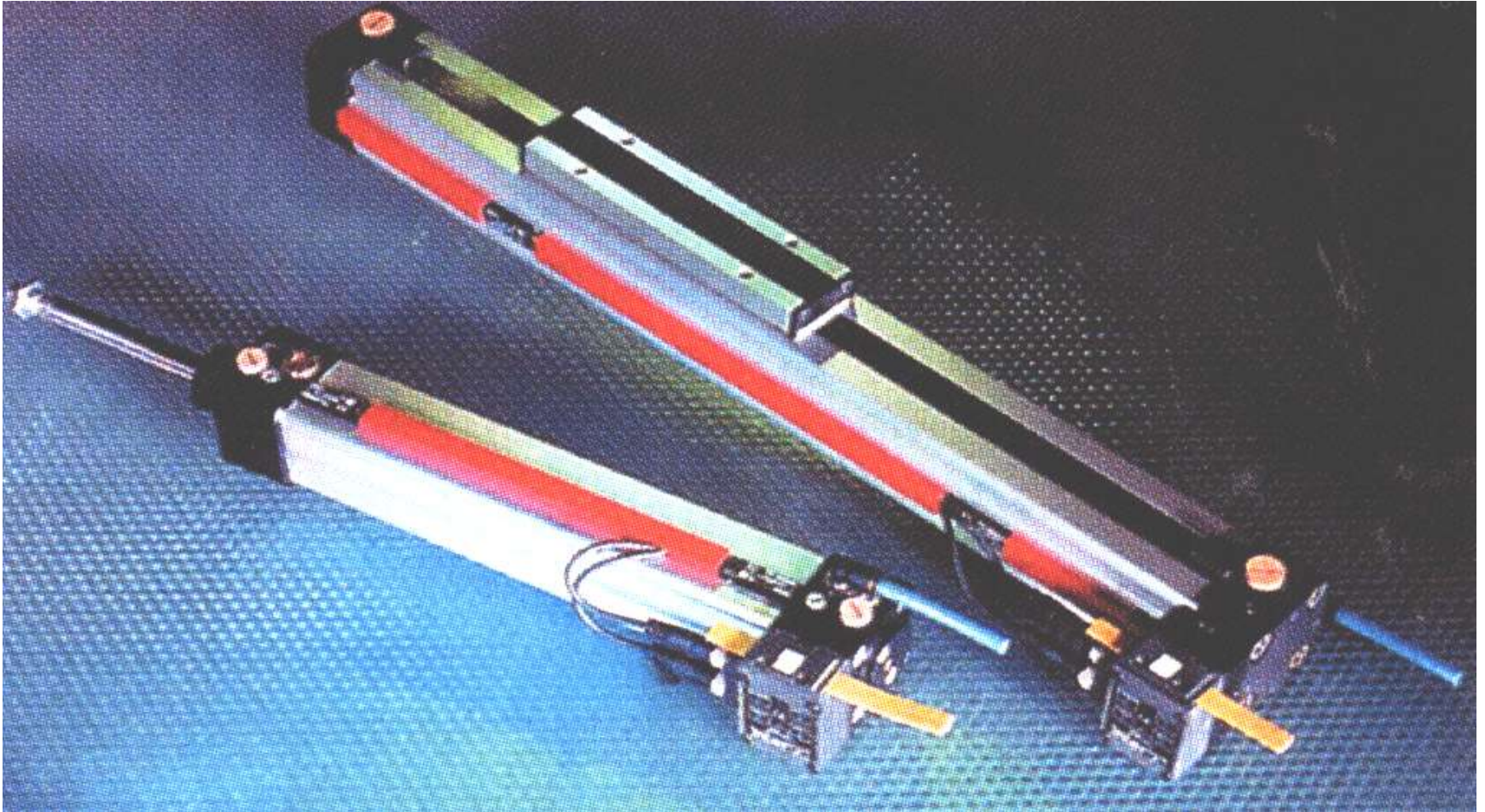
Mechatronika oferuje konstruktorom nowy sposób realizacji tych modułów, które nie muszą mieć tradycyjnej postaci mechanicznej, lecz mogą być rozwiązaniem mechatronicznym (z sensorami, aktorami i sterowaniem mikroprocesorowym). Mechatronika to również sposób kształcenia specjalistów, zajmujących się opracowaniem, projektowaniem i konstruowaniem, a także produkcją i eksploatacją urządzeń oraz układów mechatronicznych. Uwzględnia się przy tym, że kształcenie inżyniera musi być wielokierunkowe i nie może się ograniczać do jednej tylko dziedziny techniki.

Inżynier powinien umieć wykorzystać możliwości wynikające z zastosowania elektrotechniki, elektroniki i informatyki w konstrukcjach maszyn i mechanizmów. Powinien umieć zaprojektować obwody elektryczne, uruchamiające zestaw elektrohydraulicznych czy elektropneumatycznych elementów sterujących.

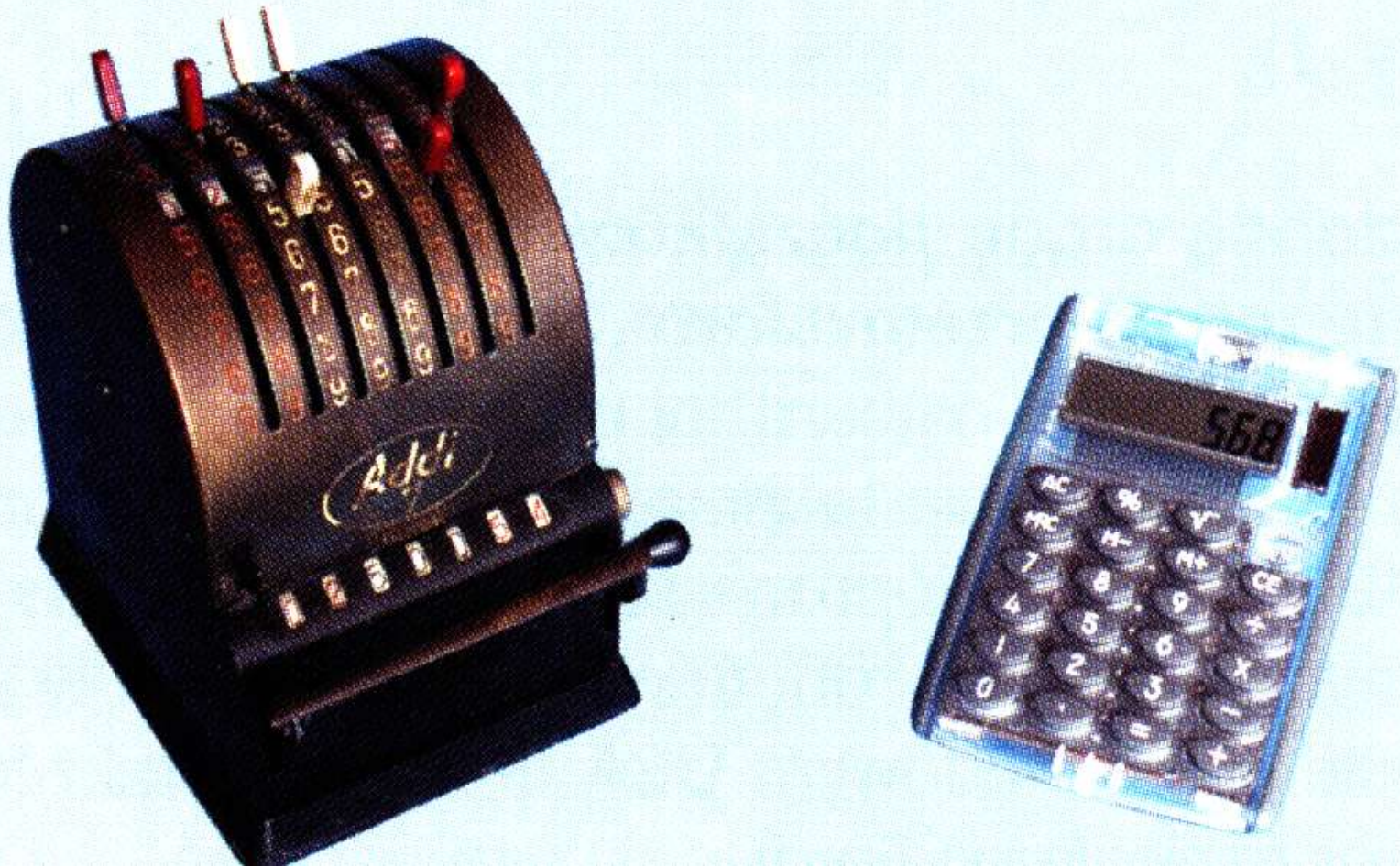


Rys. 2. Ewolucja techniki mechanicznej prowadząca do mechatroniki

Mechatroniczne jednostki ruchu stosowane w automatyzacji i robotyzacji współczesnych procesów produkcyjnych



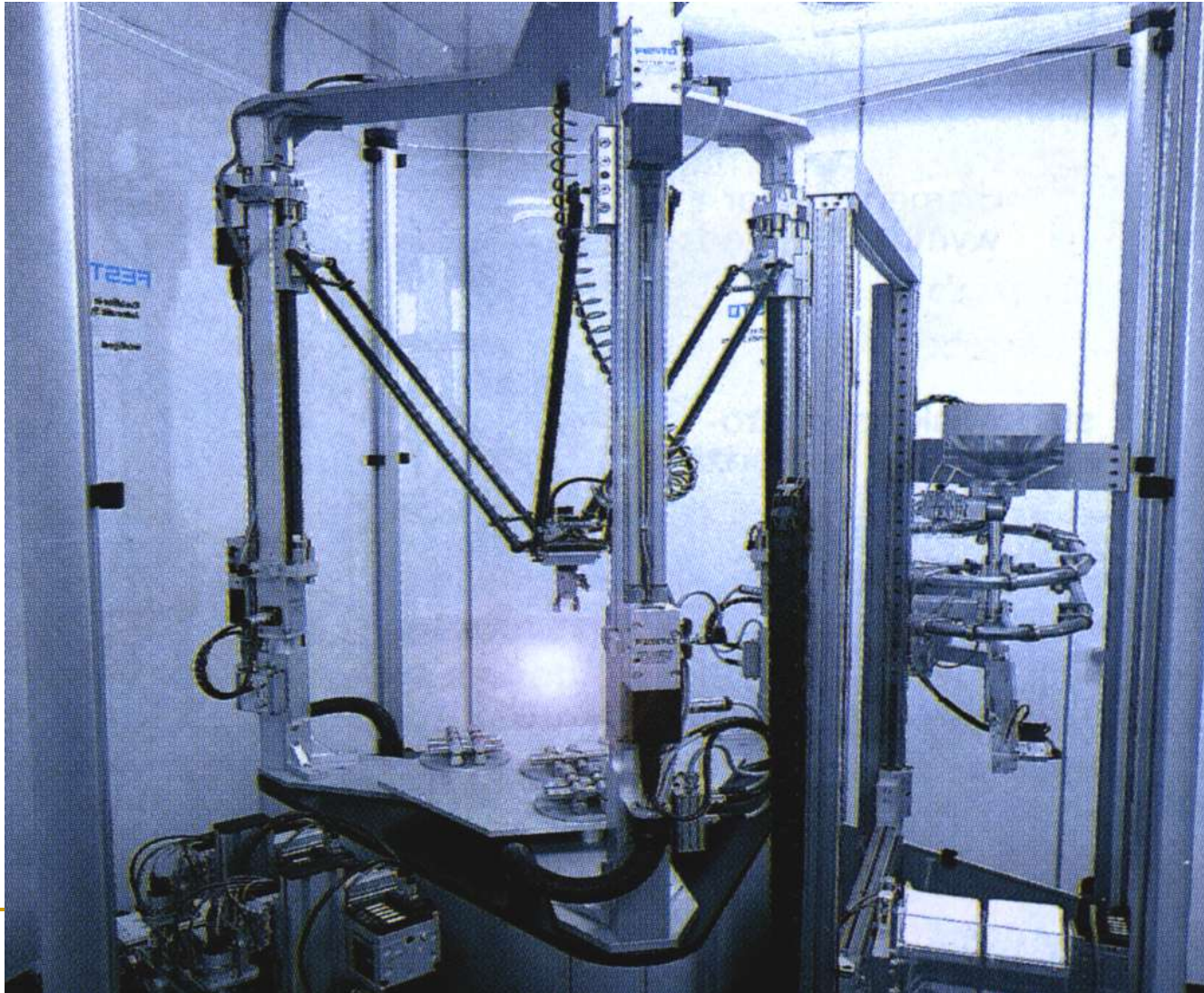
Kalkulator mechaniczny z lat 60. ubiegłego wieku i współczesny, wielofunkcyjny, zasilany fotoogniwem kalkulator elektroniczny – ilustracja postępu w rozwoju produktów powszechnego użytku



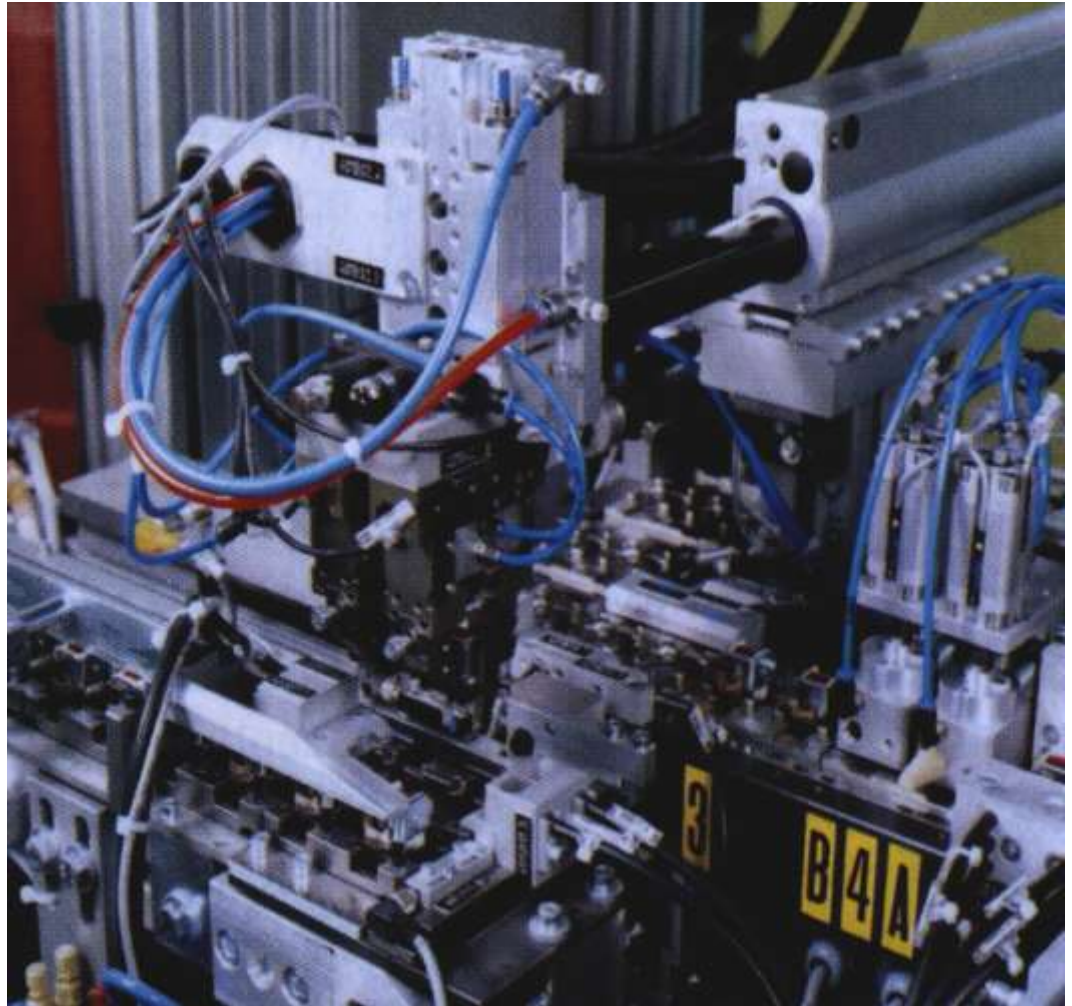
Mechatroniczne moduły ruchu łączące funkcje obrotu i chwytania, stosowane jako wyposażenie robotów przemysłowych



Robot przemysłowy opracowany dla zastosowań w liniach montażowych urządzeń mechatronicznych



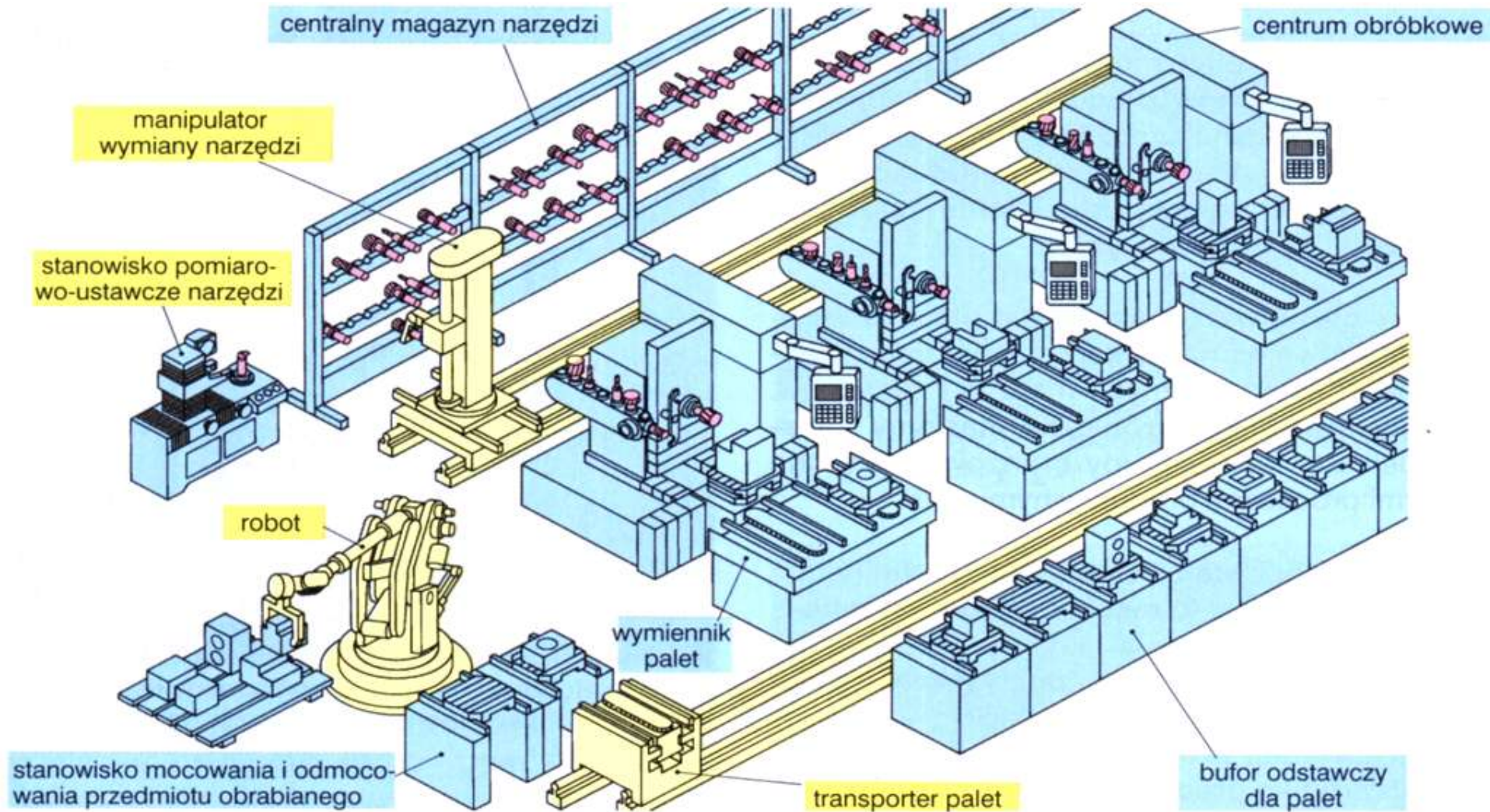
Podsystemy mechatroniczne współczesnych linii produkcyjnych



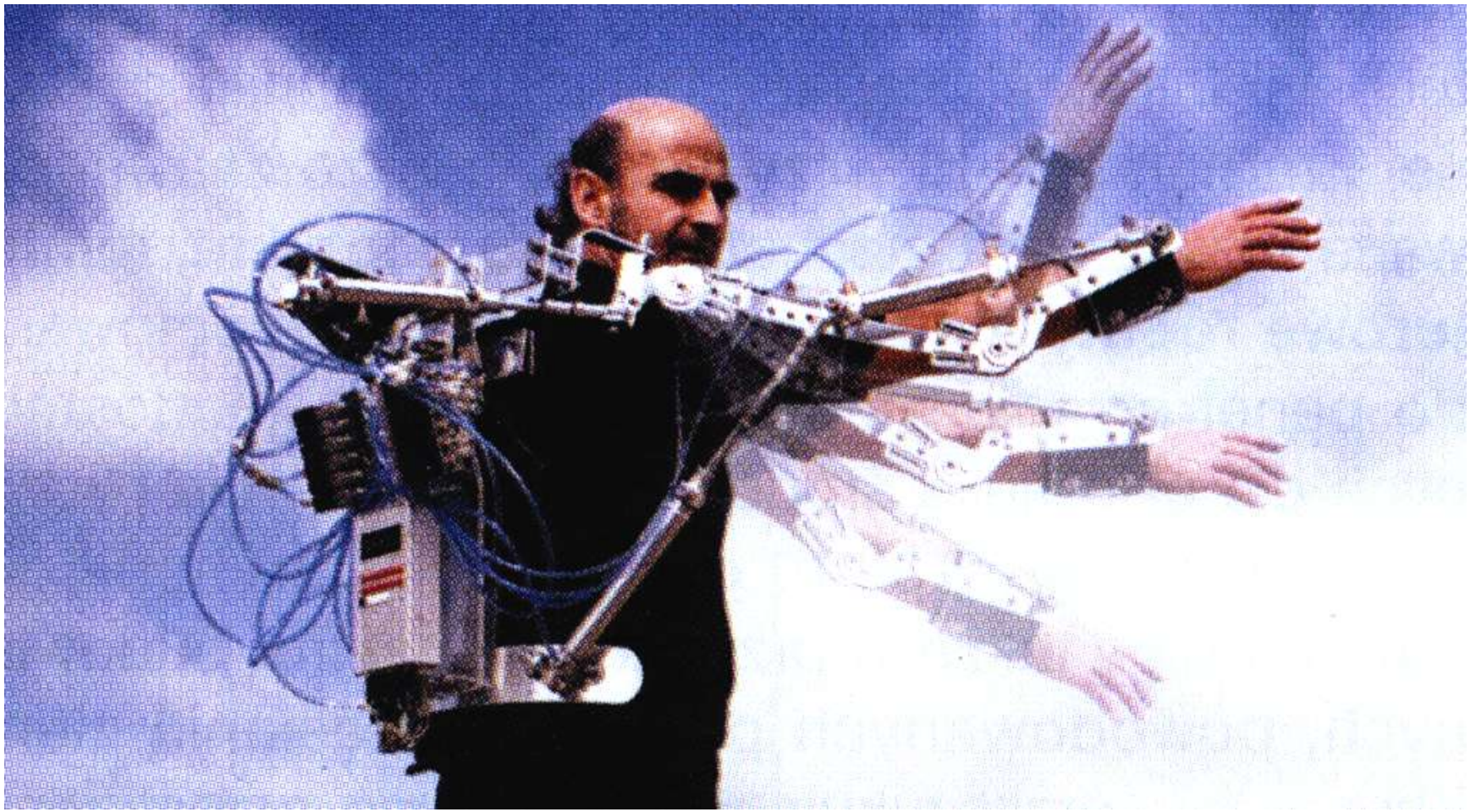
Interaktywne programowanie wirtualne zrobotyzowanego stanowiska produkcyjnego



Elastyczny system wytwarzania (FMS) – rysunek poglądowy: kolorem niebieskim oznaczono maszyny produkcyjne, kolorem żółtym – maszyny manipulacyjne i transportowe



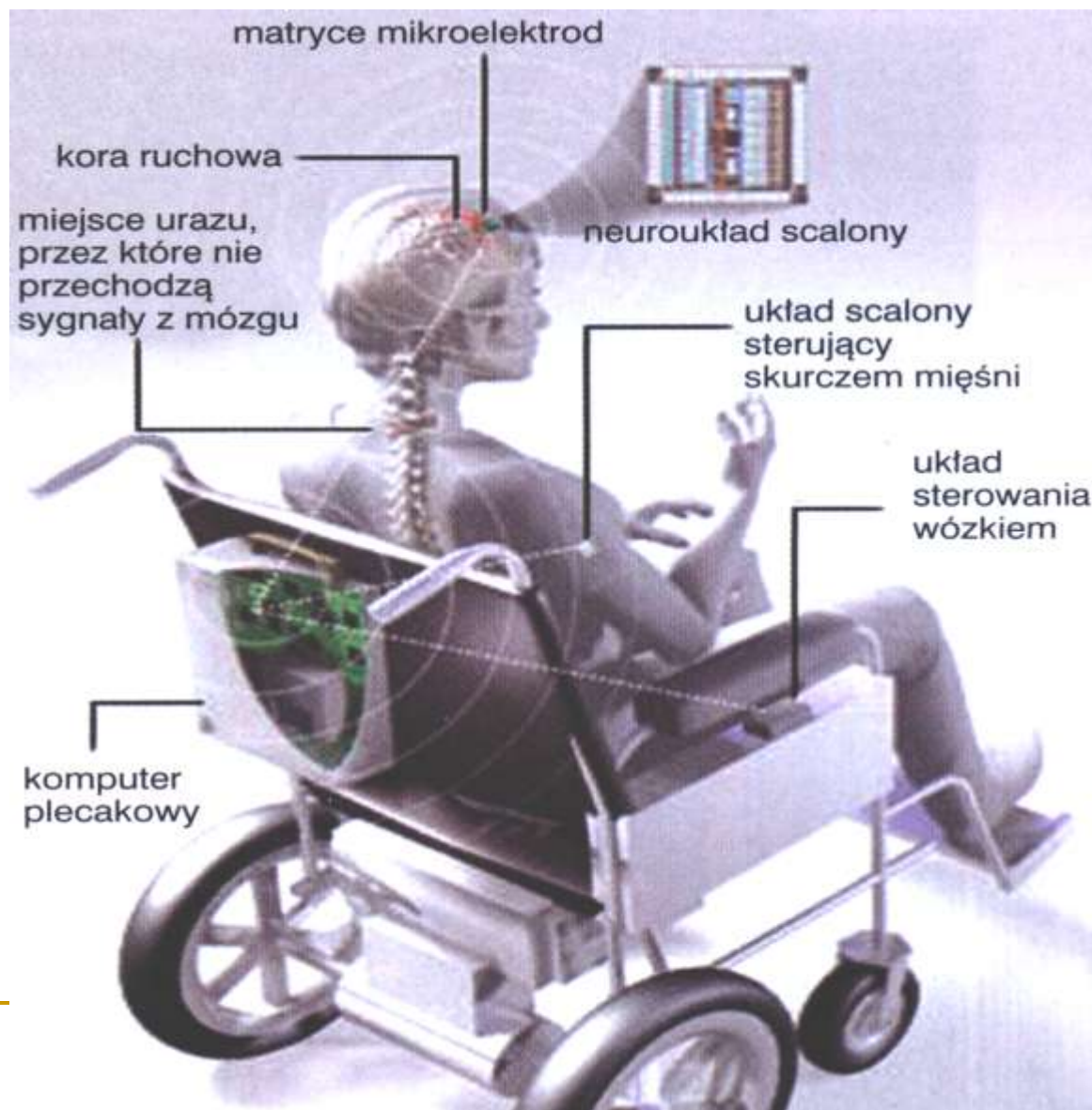
Opracowane w Instytucie Sztuki , Informacji i Technologii w Hamburgu mechatroniczna proteza wspomagająca procesy rehabilitacji ruchu ramienia



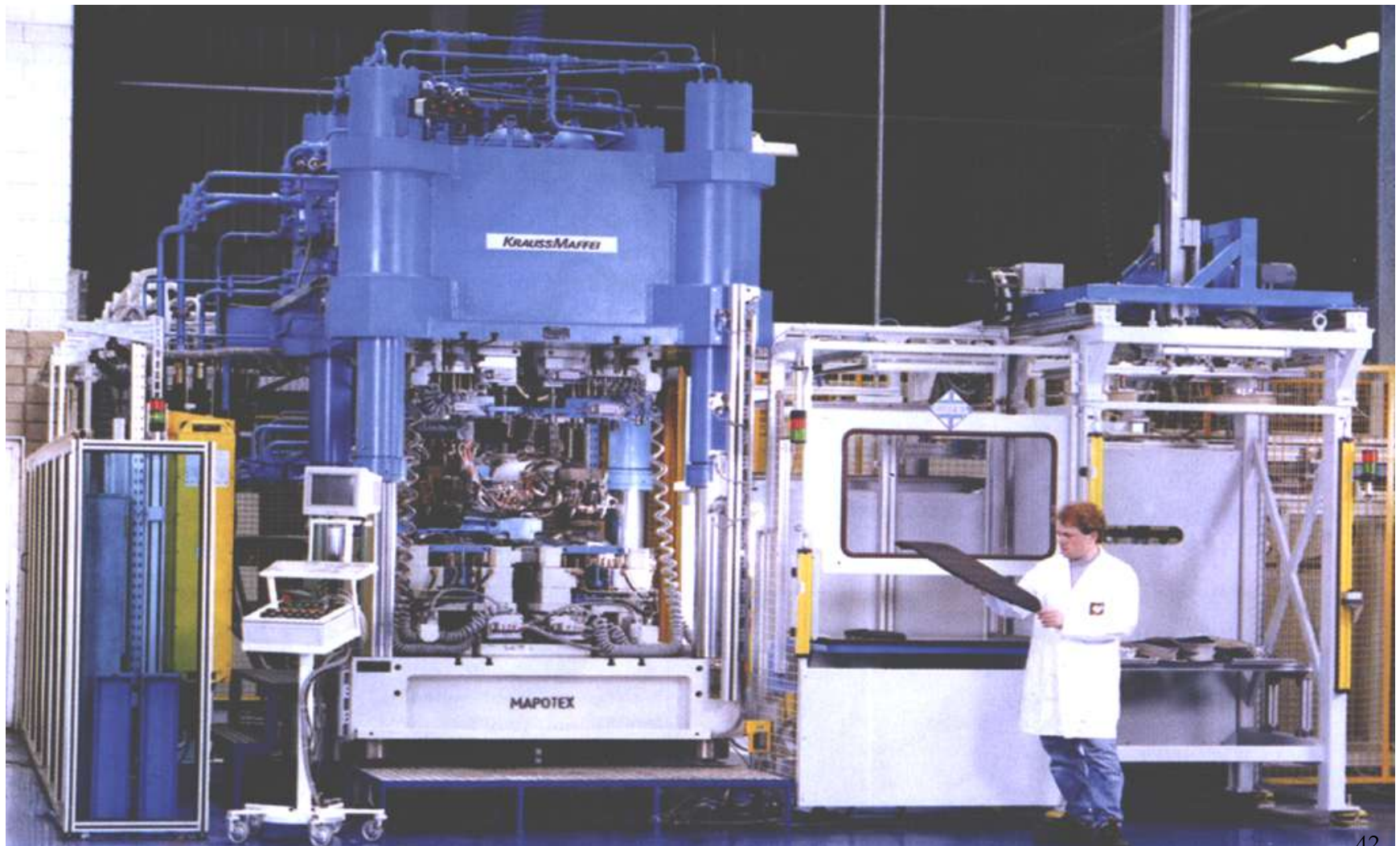
Za pierwszą operację wykonaną na odległość uważa się usunięcie kamieni żółciowych, wykonane w 2001 r. przez prof. Jacquesa Marescaux w Nowym Jorku, pacjentce operowanej w szpitalu w Strassburgu



Sterowany bioprądami samojezdny wózek inwalidzki dla osób sparaliżowanych – to neurorobotyka, czyli też mechatronika



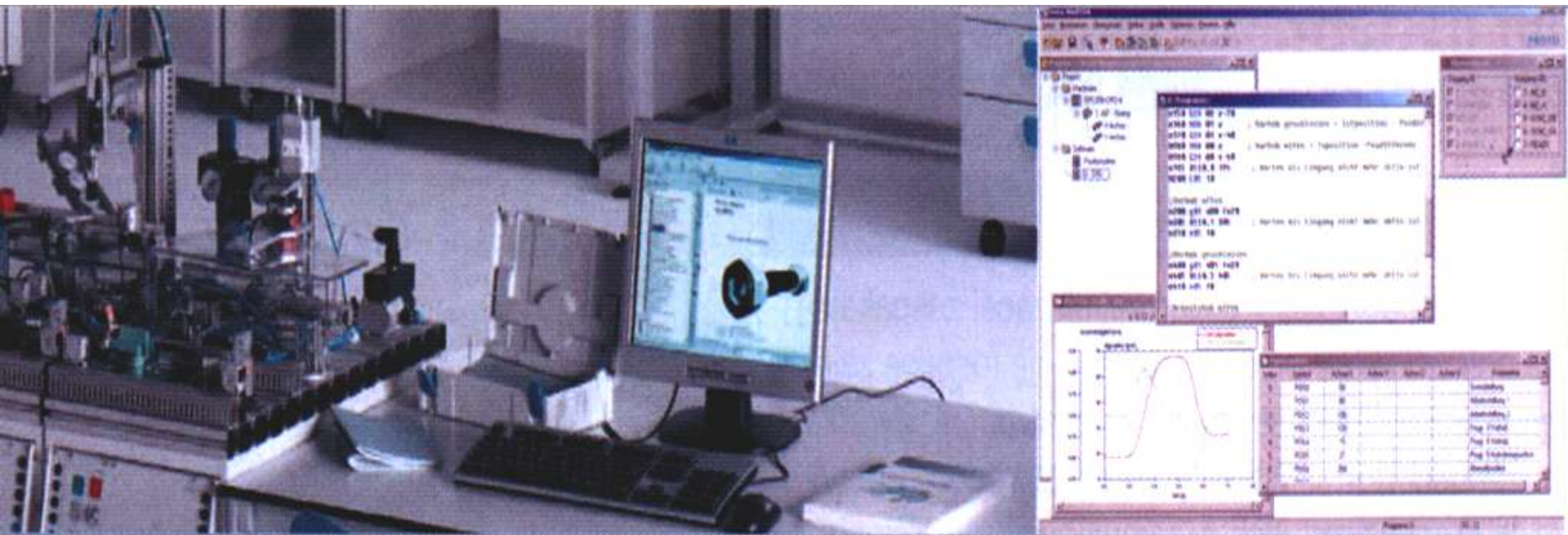
Stanowisko produkcyjne elementów z tworzyw sztucznych dla przemysłu samochodowego – przykład nowej generacji mechatronicznych wielkogabarytowych maszyn produkcyjnych



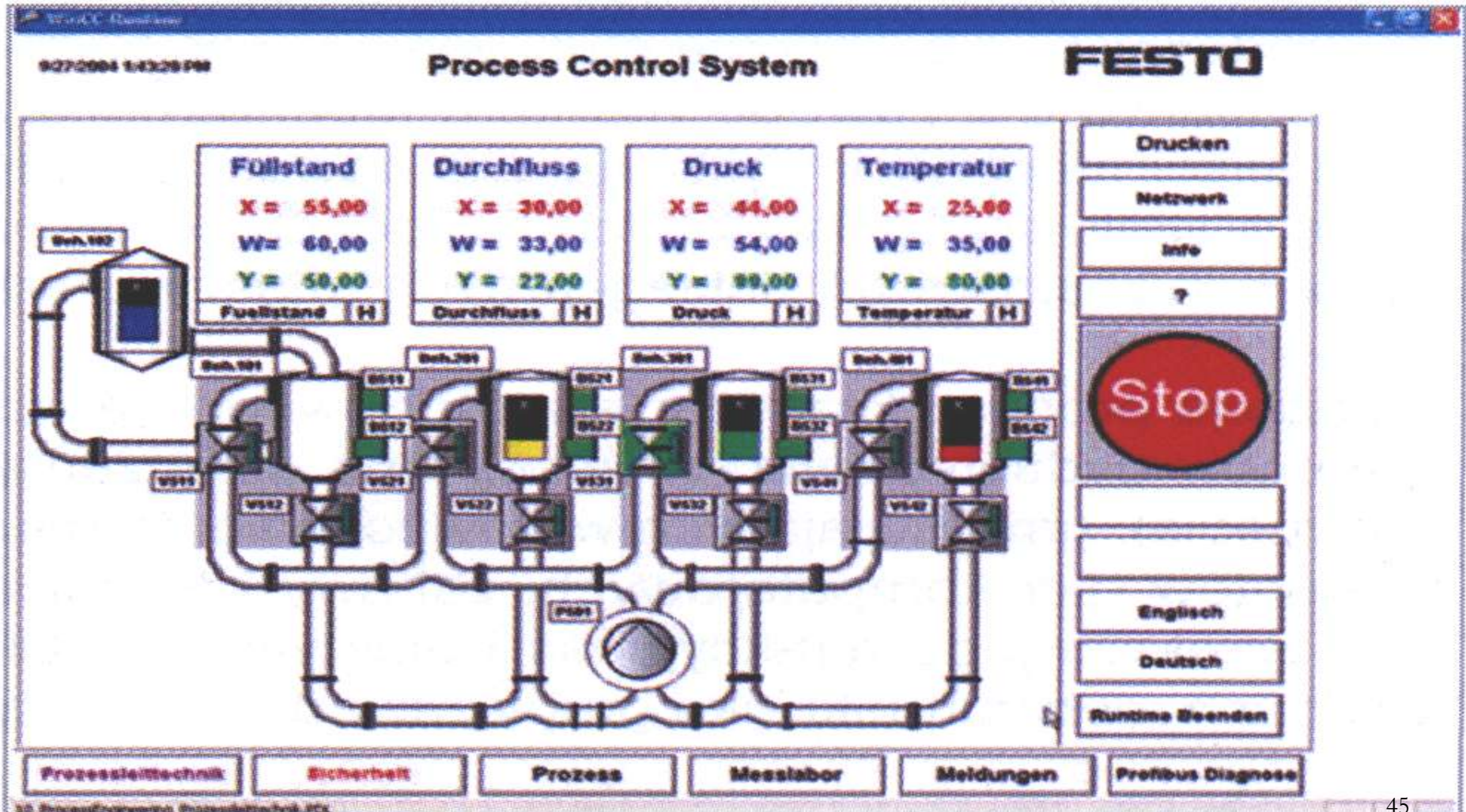
Stanowisko badawcze wyposażone w zrobotyzowany system manipulacyjny próbek i komputerowy system sterowania przebiegiem eksperymentów i analizy wyników – przykład mechatronizacji badań naukowych i usługowych



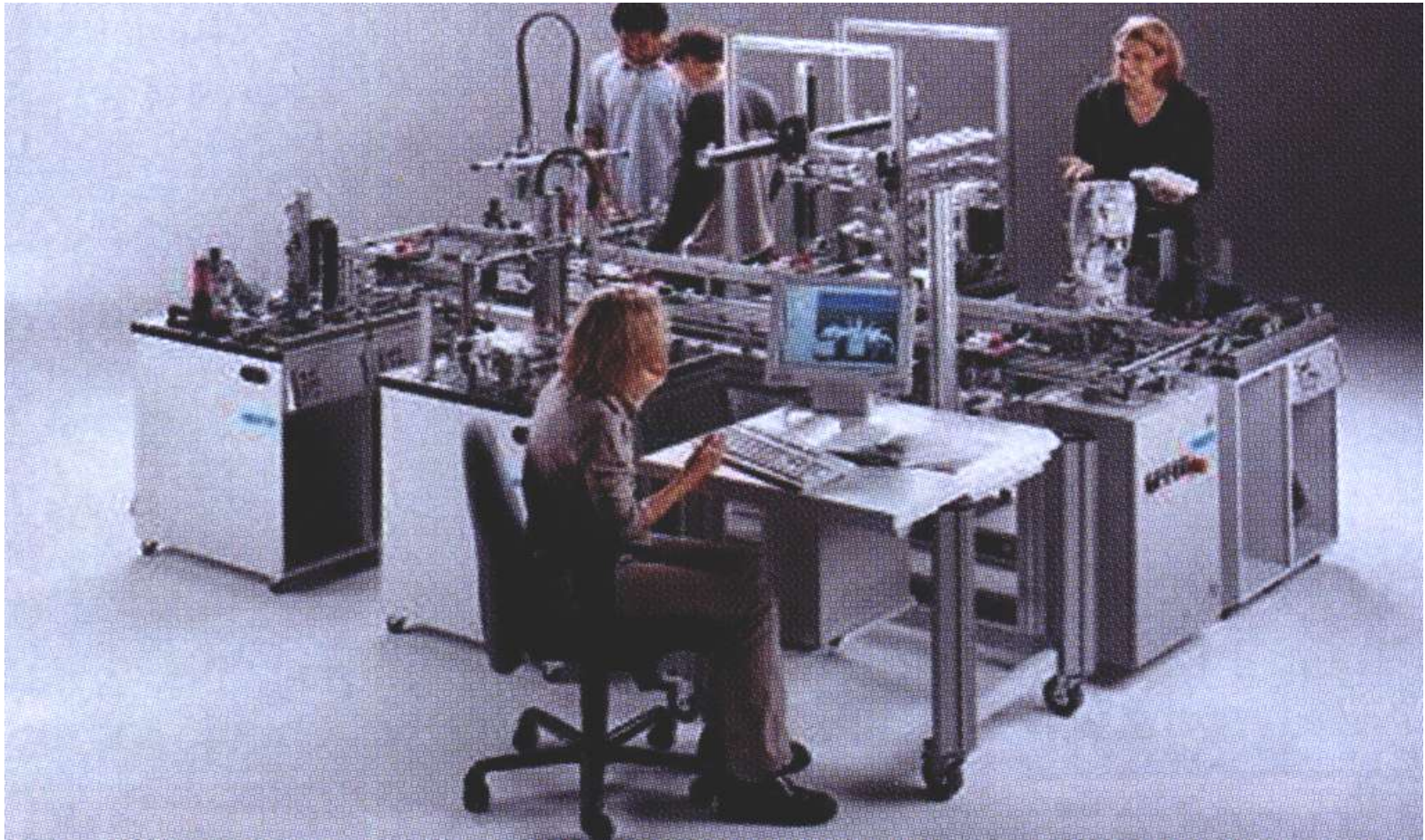
Stanowisko projektowo-badawcze parametryzacji elementów, podzespołów i modułów systemu mechatronicznego z wykorzystaniem modelowania funkcjonalnego jego zachowań dynamicznych (system WinPISA – Festo)

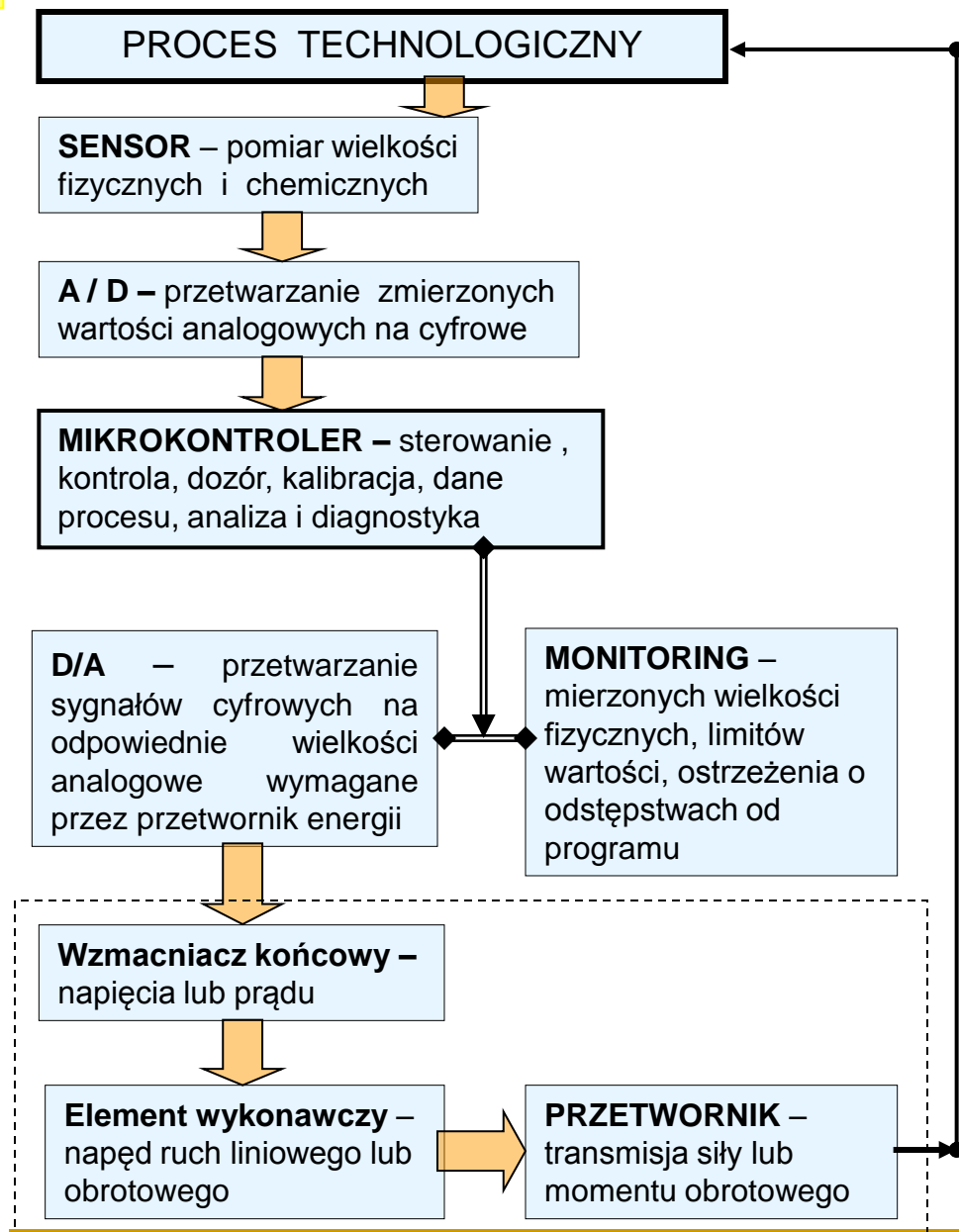


Komputerowo wspomagane sterowanie i monitorowanie procesów przemysłowych (system WinCC firmy Siemens w zastosowaniach firmy Festo)



Nowoczesna pracownia mechatroniki powinna integrować kształcenie w zakresie mechaniki, elektroniki, informatyki





Jednym z podstawowych celów mechatroniki jest optymalizowanie ruchu urządzeń mechanicznych przez integrowanie układów elektronicznych ze strukturami mechanicznymi.

Wykorzystuje się przy tym rozdzielanie funkcji, co prowadzi do optymalnych rozwiązań. Przez rozdzielanie funkcji rozumie się sposób, w jaki całkowita funkcja urządzenia jest dzielona na odrębne moduły realizujące funkcje częściowe oraz to, jak każdy z tych modułów jest fizycznie realizowany i gdzie jest umieszczany.

Schemat strukturalny systemu mechatronicznego



POWODY INTEGROWANIA MIKROPROCESORÓW W URZĄDZENIA

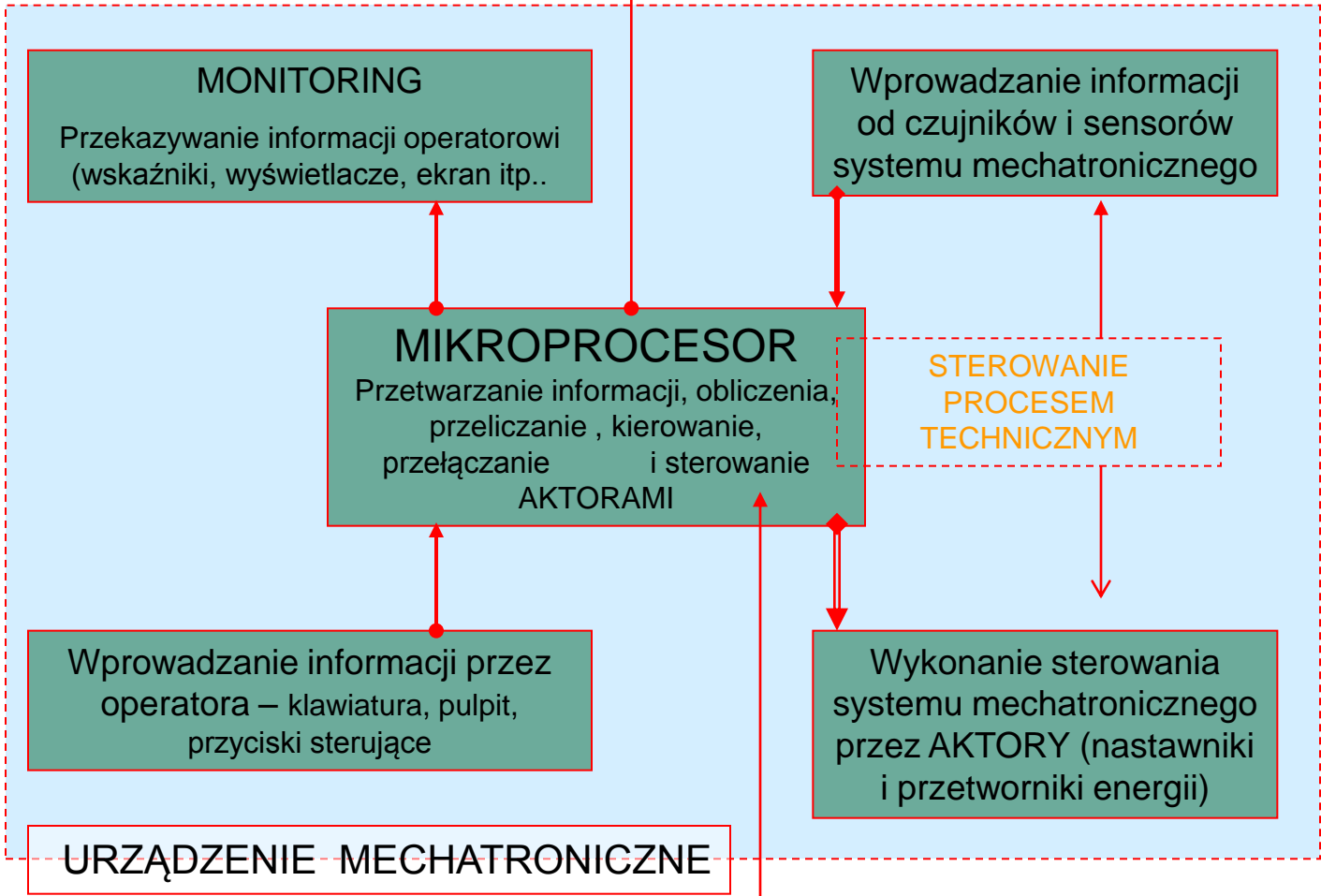
MECHANICZNE to zwiększenie zakresu charakterystyk, uproszczenie konstrukcji i innowacyjność, (przy poprawie charakterystyk zasadnicza konstrukcja urządzenia zostaje bez zmian), natomiast dodanie mikroprocesora pozwala zwiększyć dokładność, rozszerzyć pasmo prędkości roboczej, podnieść szybkość pracy czy elastyczność zastosowania oraz poprawić niezawodność.

Zastosowanie mikroprocesorów umożliwia stworzenie nowych produktów czy systemów, które dotychczas nie mogły być zrealizowane, robotów i maszyn wymagających zaawansowanych technologii (np. inteligentnego systemu sztucznego serca, przyrządów do rozpoznawania obrazów).

Poprawa charakterystyk i uproszczenie złożonych mechanizmów nie wykluczają się wzajemnie, a w wielu przypadkach, zastosowanie mikroprocesorów daje podwójną korzyść: poprawia charakterystyki techniczne i obniża koszty. Prawie każda nowa konstrukcja mechaniczna powinna brać pod rozwagę system mikroprocesorowy jako możliwe rozwiązanie. Jeżeli wytwarzany produkt ma pozostać konkurencyjny, to stara konstrukcja powinna zostać uzupełniona o rozwiązanie mechatroniczne.



KOMUNIKACJA Z INNYMI URZĄDZENIAMI



KOMUNIKACJA Z WSPÓLPRACUJACYMI URZĄDZENIAMI



POZIOMY MECHATRONIZACJI - mogą być oceniane na różne sposoby.

1. na ocenie poziomu zainstalowanej elektroniki;
2. na ocenie stopnia prostoty konstrukcji mechanizmów;
3. na stopniu integracji mechaniki z elektroniką,

O **poziomie mechatronizacji urządzenia** można także sądzić na podstawie tego, w jakim stopniu obniżają się jego możliwości, kiedy całkowicie przestanie funkcjonować elektronika. Z takiego punktu widzenia stopień mechatronizacji współczesnych samochodów jest raczej ograniczony; 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 zwiększenie zakresu i poprawienie charakterystyk, mniej zaś - uproszczenie konstrukcji mechanicznej.

UNIWERSALNY SCHEMAT URZĄDZENIA MECHATRONICZNEGO można otrzymać przez dodawanie do aktorów, sensorów i procesorów - elementów, za pomocą których operator wprowadza oraz otrzymuje informację do lub z tego systemu. Schemat jest słuszny zawsze wtedy, gdy człowiek operator nie nadzoruje procesu technicznego swoimi zmysłami i nie wpływa na ten proces czynnościami ruchowymi (motoryką), lecz stosuje do tego celu sterowanie (sterownik mikroprocesorowy), któremu wydaje rozkazy i z którego otrzymuje meldunki zwrotne. Bezpośrednie włączenie człowieka w proces zastąpione jest dialogiem między człowiekiem i sterowaniem (mikroprocesorem).

Cechą charakterystyczną urządzenia mechatronicznego jest rozbudowane przekazywanie informacji do, z lub wewnątrz systemu. Nadaje ono dodatkową wartość układowi mechanicznemu i jest, być może, najbardziej znaczącym dokonaniem ostatnich czasów - stanowi podstawę do symulowania sztucznej inteligencji.

Jako systemy mechatroniczne rozumie się całość następujących systemów częściowych:

- systemu podstawowego (zwykle mechanicznego),
- aktorów,
- sensorów,
- procesorów i przetwarzania danych procesowych.

Do scharakteryzowania systemów mechatronicznych wybierzmy, z dużej liczby opisów, trzy następujące:

- Typowy system mechatroniczny rejestruje sygnały, przetwarza je i wydaje sygnały, które przetwarza na przykład w siły i ruchy.
- Mechatronika może być widziana jako fuzja dyscyplin mechanicznych i elektrycznych w nowoczesnych procesach inżynierskich. Jest ona względnie nowym pojęciem w konstruowaniu systemów, urządzeń i produktów, ukierunkowanym na osiągnięcie optymalnej równowagi między podstawową strukturą mechaniczną i jej całkowitym sterowaniem
- Synergiczna integracja inżynierii mechanicznej z elektroniką i inteligentnym sterowaniem komputerowym w konstruowaniu i wytwarzaniu produktów i procesów.

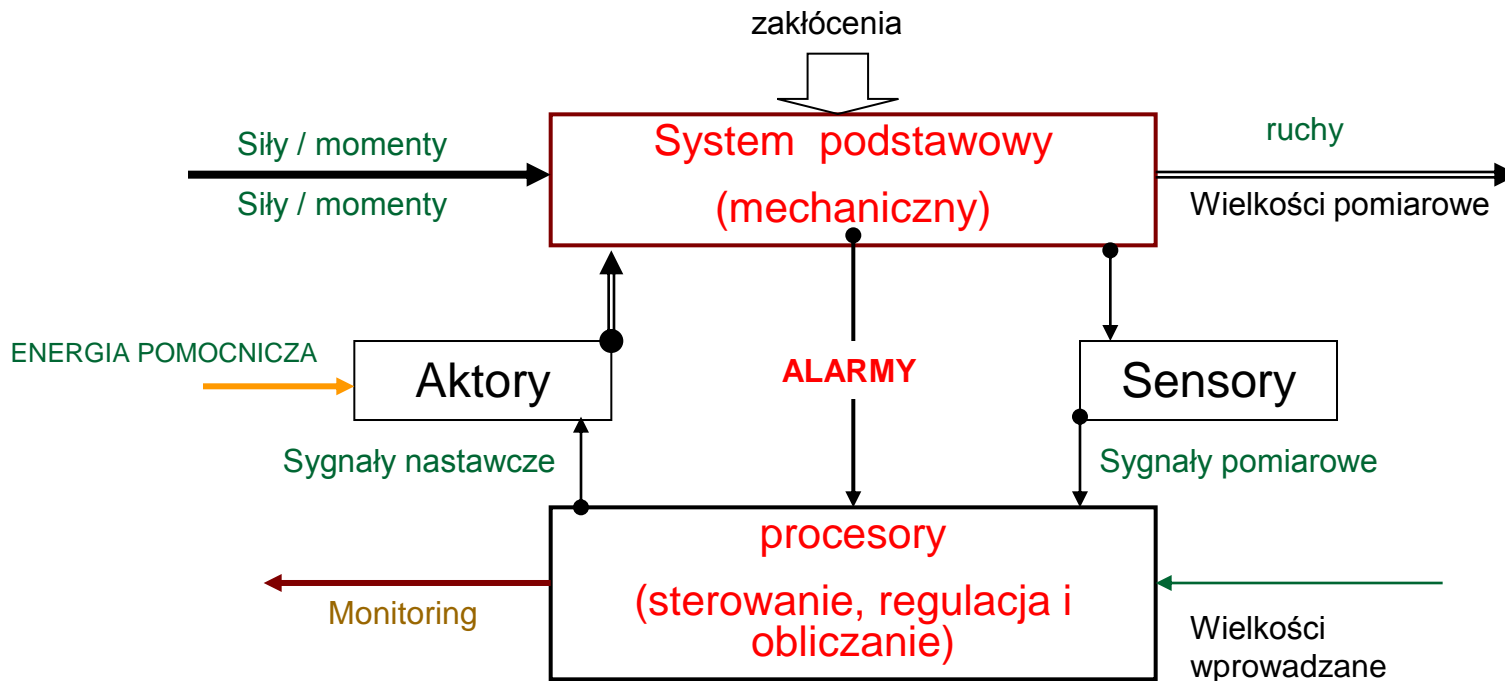
Mechatronika ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje następujące dziedziny:

- **mechanikę** (mechanikę techniczną, budowę maszyn, mechanikę precyzyjną),
- **elektrotechnikę/elektronikę** (mikroelektronikę, elektronikę siłową, technikę pomiarów, aktorykę),
- **przetwarzanie informacji** (teorię systemów, przetwarzanie danych procesowych, sztuczną inteligencję).

Ogólny schemat mechatroniki jako problemu syntezy.

Ważnymi wielkościami pomiarowymi w systemach mechatronicznych są wielkości:

- **elektryczne** (prąd, napięcie, natężenie pola, magnetyczna gęstość strumienia itd.),
- **mechaniczne** (droga, prędkość, przyspieszenie, siła, moment obrotowy, temperatura, ciśnienie itd.).



Mechatronika jako problem syntezy

Duże znaczenie dla zastosowania koniecznych do tego systemów pomiarowych ma ich zdolność integrowania z procesem. Zdolność ta zależy istotnie od ich dynamiki, rozdzielczości, odporności na zakłócenia, trwałości, miniaturyzacji, jak również tego, czy nadają się do cyfrowej obróbki sygnału.

Za pomocą aktorów sygnały nastawcze, wytworzone za pomocą obróbki informacji, przetwarzane są w wielkości nastawcze.

Działanie członów nastawczych jest oparte na wzmacnianiu energii. Dlatego konieczna jest energia pomocnicza. Może być to energia elektryczna czy plynowa (hydrauliczna, pneumatyczna).

Nowoczesne człony nastawcze mają obwody regulacji położeniowej, które często pracują w sposób cyfrowy i oparty na modelu. Wskutek tego możliwe są duże dokładności pozycjonowania przy jednocześnie dobrej dynamice nastawiania.

Niekiedy przebieg procesu mechatronicznego przedstawia się jako proces odbywający się w płaszczyznach:

- zarządzania;**
- nadzoru;**
- regulacji;**
- procesów mechanicznych**

Płaszczyzny (poziomy) przetwarzania danych procesowych oraz sprzężenie pomiędzy płaszczyznami procesowymi pokazano na rys.3.

Jedna z istotnych cech systemów mechatronicznych polega na tym, że ich właściwości w dużej mierze są określone przez elementy niematerialne, to znaczy przez oprogramowanie.

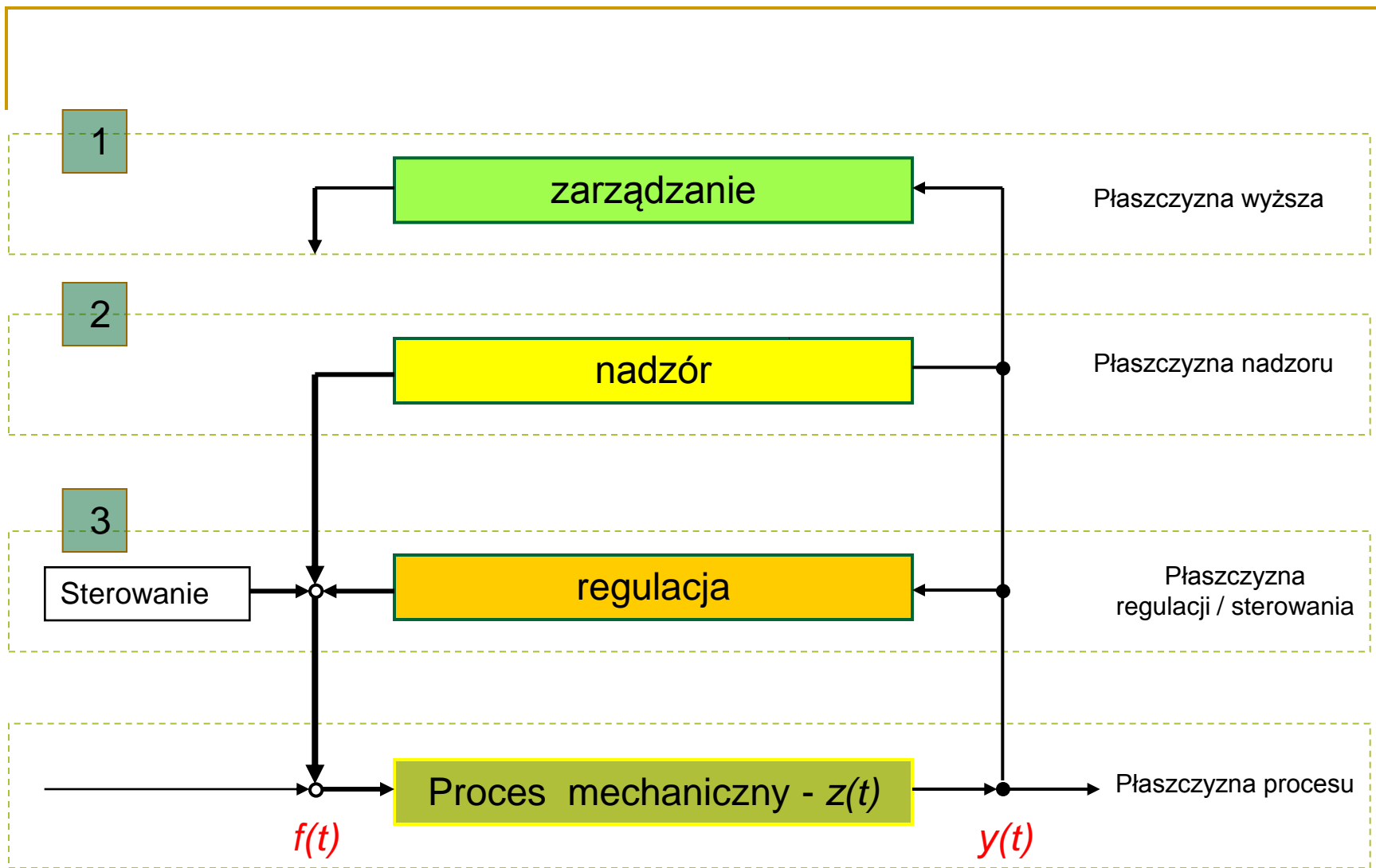
Przetwarzanie danych procesowych odbywa się za pomocą odpowiednich mikrokontrolerów (mikrosterowników), specjalnie przystosowanych do przetwarzania W czasie rzeczywistym. Zawierają one konieczne do tego funkcje, jak pamięć dla danych, pamięć dla programu, przetwornik analogowo-cyfrowy, porty wejście / wyjście, zarządzanie przerwaniami itd.

Zarządzanie i przetwarzanie danych procesowych odbywa się na wielu płaszczyznach i przejmuje - w zależności od stopnia zadania - różne zadania regulacji, nadzoru i optymalizacji. Na przykład pierwsze trzy płaszczyzny, przedstawione na rys.3, przejmują następujące zadania:

Płaszczyzna 1: zarządzanie, prowadzenie procesu;

Płaszczyzna 2: meldowanie o alarmie (kontrola wartości granicznej), nadzór i diagnoza uszkodzeń, wyprowadzenie prostych przedsięwzięć dla dalszego operowania lub zatrzymanie;

Płaszczyzna 3: koordynacja systemów częściowych, optymalizacja, ogólne zarządzanie (ang. *management*) procesem.



Płaszczyznowy (poziomy) przetwarzania danych procesowych

Ogólnie zasadą jest, że płaszczyzny dolne reagują szybko i działają lokalnie, podczas gdy płaszczyzny górne reagują powoli i przejmują zadania globalne.

W najbardziej znanych podejściach do systemów mechatronicznych przetwarzanie sygnału i przetwarzanie danych procesowych dotyczy płaszczyzn dolnych. Oznacza to, że przejmują one sterowanie i regulację oraz proste funkcje nadzoru.

Typowym tego przykładem jest regulacja pojedynczej osi robota przemysłowego. Cyfrowe przetwarzanie informacji pozwala jednak na znacznie więcej, na przykład na wspomnianą już koordynację i optymalizację systemów częściowych i przez to na realizację komponentów sztucznej inteligencji. Przykładem może być autonomicznie działający robot mobilny, który dysponuje systemem multisensorowym i samoczynnie może podejmować i wykonywać decyzje dotyczące swego działania.

ANALIZA PROCESOWA SYSTEMÓW MECHATRONICZNYCH

Pojęcia systemu i procesu odgrywają w dalszych rozważaniach ważną rolę i dlatego zostaną bliżej objaśnione.

Ogólnie przyjmuje się, że **systemy** są definiowane jako część rzeczywistości. Przedstawiają one odgranicezoną konfigurację wzajemnie na siebie oddziałujących tworów i z powodu tej właściwości mają charakter względny. Odgraniczenie systemu od jego otoczenia może być opisywane za pomocą powierzchni otaczającej - granicy systemu. Traktując to dokładniej, system jest ciągle całością systemów częściowych, które powiązane są informacyjnie między sobą i z otoczeniem.

Szczególne znaczenie dla problematyki poruszanej w tym wykładzie mają **systemy mechatroniczne**. Będziemy przez to rozumieć całość systemów częściowych:

- system podstawowy (zwykle mechaniczny),
- aktory,
- sensory,
- proces i przetwarzanie danych procesowych.

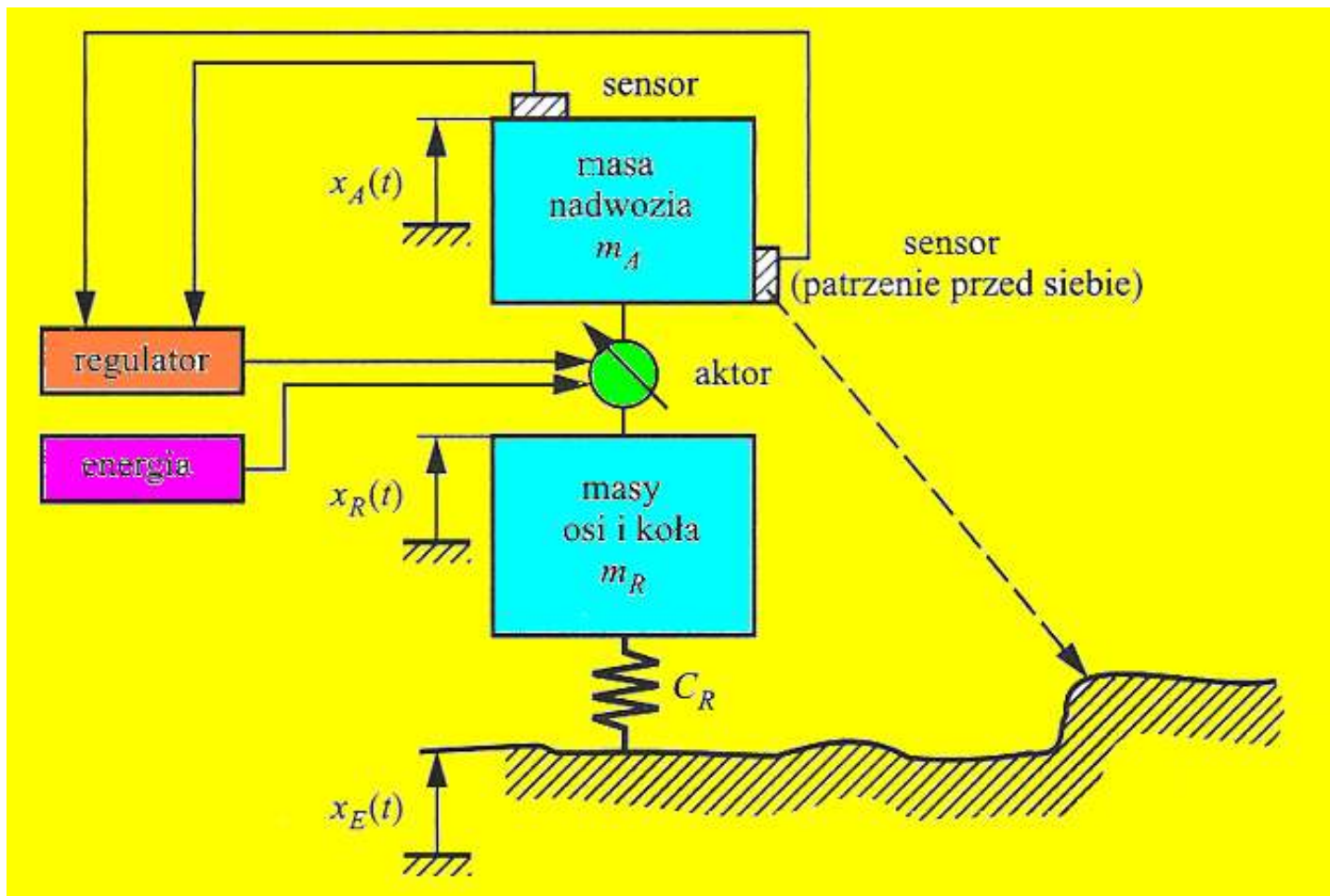
Systemy te są także nazywane **systemami aktywnymi**. Proces jest ciągiem kolejno następujących po sobie w czasie zjawisk lub stanów w systemie. Przez proces jest opisywane przekształcenie i/lub transport materii, energii i informacji. Przedstawienie procesu prowadzi do czasowych przebiegów sygnałów, stanów itd. Do opisu procesów konieczne są dalsze wielkości.

Chodzi tu o **stany systemu**. Stany te są ujmowane w postaci **wektora stanu z** . Za pomocą wektora stanu opisuje się w czasie historię stanów systemu. Dla systemów mechatronicznych jest typowe, że wymagamy aktywnej zmiany stanów systemu. W tym celu wpływa się (ingeruje) na system za pomocą wielkości wejściowych. Pojęcie procesu jest więc nierozdzielnie związane ze zmianą w czasie, to znaczy z **dynamiką systemu**. Także to pojęcie ma charakter ogólny i może mieć różną naturę. Dla nauczyciela procesem jest kierowanie klasą szkolną, dla robota pozycjonowanie jakiejś części, dla sterownika obrabiarki proces skrawania itd.

Przykład 1.

Zasada aktywnego zawieszenia w pojazdach

W dynamice pojazdów bierne zawieszenia kół mogą być zastąpione zawieszeniami czynnymi (aktywnymi). Przez to lepiej można spełnić całokształt wymagań dotyczących komfortu jazdy i zachowania się pojazdu w ruchu.



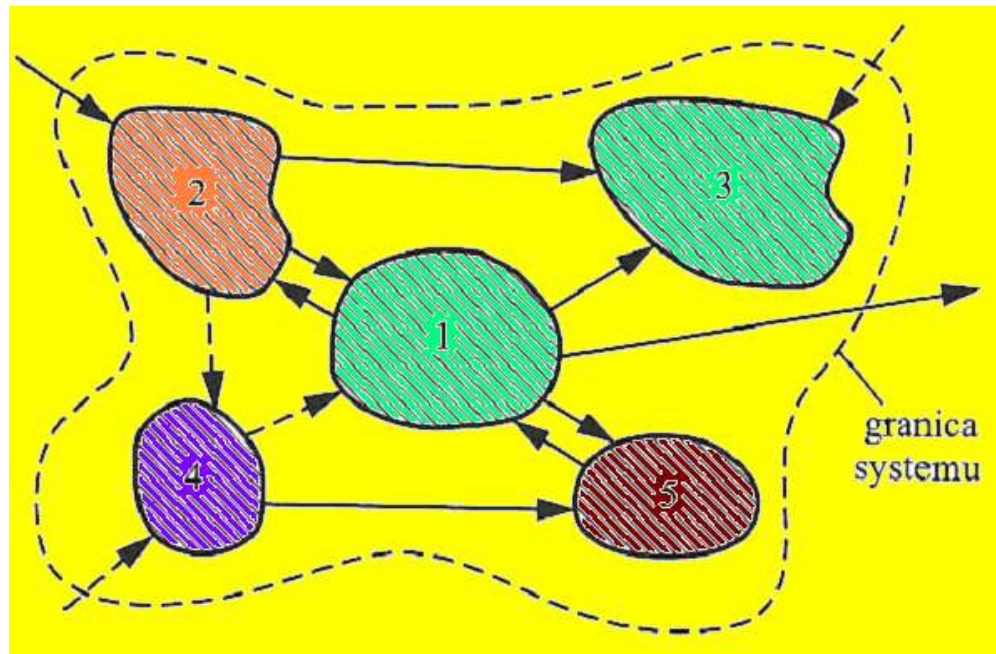
Schemat aktywnego zawieszenia jednego z kół jezdnych pojazdu

Mechaniczny system podstawowy składa się z układu sprężyna – masa dla ruchu pionowego. Zainstalowane są sensory do pomiaru powstającego przyspieszenia (jako miary komfortu jazdy) i do wykrywania (optycznego) **pojedynczych** przeszkód przez patrzenie przed siebie. Możliwe w ten sposób informacja o profilu drogi pozwala aktywnemu systemowi zawieszenia dopasować się podczas zbliżania się do przeszkody drogowej ruchu pionowego koła jezdneho. Aktorami mogą być pneumatyczne lub hydrauliczne człony nastawcze.

Stany systemu są opisywane wektorem stanu i zawierają drogę drgań i prędkości drgań nadwozia pojazdu, jak również razem ujęte masy osi i koła.

$$z(t) = \left[x_A(t), x_R(t), \dot{x}_A(t), \dot{x}(t) \right]^T$$

Każdy system i jego otoczenie mniej lub bardziej oddziałują wzajemnie na siebie. Oddziaływania te są traktowane jako więzy zewnętrzne, w odróżnieniu od więzów wewnętrznych, które opisują powiązania poszczególnych systemów częściowych. Rysunek pokazuje zasadę budowy systemu z jego wzajemnymi oddziaływaniami. Strzałkami ciągłymi są przedstawione powiązania istotne, a przerywanymi nieistotne.



Zasadnicza budowa systemu składającego się z 5 systemów częściowych

To, jakie wielkości są istotne, zależy od postawionego celu i dlatego jest również względne.

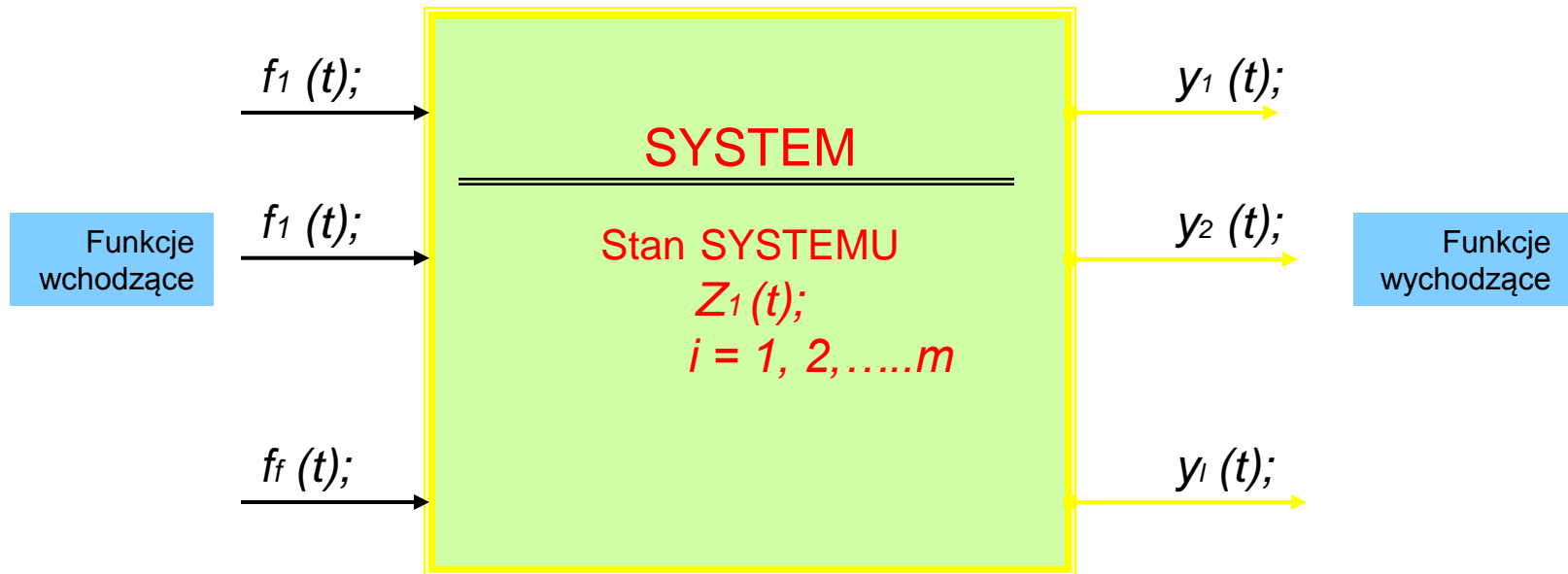
Istotne powiązania muszą: -

- wyraźnie przedstawiać rozpatrywany problem,
- być wykrywalne za pomocą istniejących metod pomiaru i określania, przy racjonalnym wysiłku.

Jako więzy systemowe wykorzystywane są sygnały. Praktycznie są to wielkości fizyczne, jak prąd, napięcie, ciśnienie, droga, temperatura, które zawierają informację o systemie. Wielkości te są dostępne przez parametry sygnału, jak amplituda, częstotliwość, faza, czy funkcje charakterystyczne sygnału, jak charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, charakterystyka fazowo-częstotliwościowa, funkcja odpowiedzi impulsowej itd.

W systemie z reguły istnieje wiele sygnałów wejściowych i sygnałów wyjściowych - $f_i(t), i = 1, 2, \dots, f$ $y_i(t), i = 1, 2, \dots, l$. Z powodu całej techniki pomiaru, rejestrowania i obróbki, jak również innych nieuwzględnionych wielkości wpływających co powoduje, że sygnały obciążone są **niepewnością - zakłócone szumem**.

Do ich opisu muszą być zastosowane metody rachunku prawdopodobieństwa, szczególnie do badania procesów przypadkowych, lub nieostrej analizy procesowej.

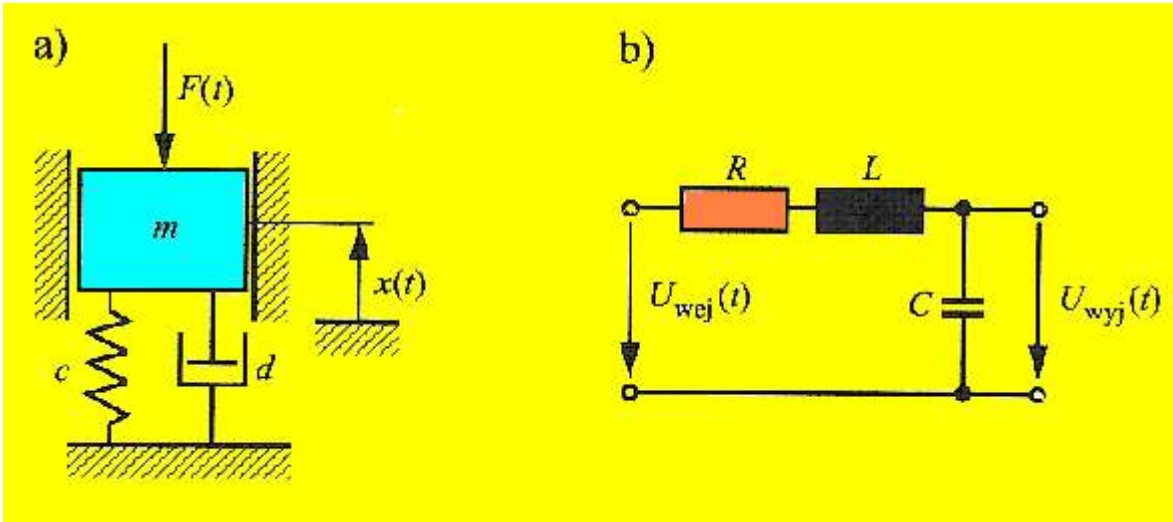


Rys 10. Ogólny schemat opisu systemu mechatronicznego

PRZYKŁAD 2.

Dla układów drgających pokazanych na rys 7 należy podać zależności między wejściem i wyjściem .

ROZWIĄZANIE 2. Poszukiwane zależności w funkcji czasu (t) jak i zakresie istoty procesów przeprowadzono za pomocą przekształceń Laplace'a.



m – masa;
 c – stała sprężystości;
 d – stała tłumienia;

R – opór [Ohma];
 L – indukcyjność ;
 C - pojemność

Prosty układ mechaniczny (a) i elektryczny układ (system) drgający

Rozwiązanie 1 w zależności od czasu:

$$a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_0 f(t), \quad y(0) = y_0, \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0. \quad 1$$

Rozwiązanie 2 w zależności od procesu:

$$Y(p) = \frac{(a_2 p + a_1) \dot{y}_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} + \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \times F(p). \quad 2$$

Funkcja 3 nazywa się funkcją przekształcenia – **transmitancją** :

$$G(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad 3$$

Porównanie parametrów układów w tablicy 1 na slajdzie nr 20

Tablica 1. Porównanie mechanicznego układu drgającego z elektrycznym

Oznaczenia / Pojęcia	Układ mechaniczny	Układ elektryczny
Wzbudzenie - $f(t)$; Wyjście - $y(t)$	Wzbudzenie siłą - $F(t)$; Droga drgań - $x(t)$	Napięcie wejściowe - $U_{wej.}(t)$; Napięcie wyjściowe - $U_{wyj.}(t)$
Współczynniki: - a_2 - a_1	m ; d ;	L ; R ;
- a_0	c ;	$\frac{1}{C}$
- b_0	1	$\frac{1}{C}$
Wielkość stanu	Droga drgań - $x(t)$; Prędkość drgań - \dot{x}	Napięcie wyjściowe - $U_{wej.}(t)$; Pochodna po czasie - $\dot{U}_{wyjś.} = f(t)$
Częstotliwość własna - ω (układu tłumionego)	$\omega = \sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{d}{2m}\right)^2}$	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$

Przez $Y(p)$ i $G(p)$ oznaczane są transformaty Laplace'a zmiennych funkcji $y(t)$ i $f(t)$.
Oznaczenia i współczynniki występujące w tych równaniach są zestawione w tablicy 1.

Z obliczonych równań wynika że zasadniczo zachowanie charakterystyk przenoszenia w układzie mechanicznym i w układzie elektrycznym są identyczne. Takie układy nazywane są również **członami drugiego rzędu z opóźnieniem**

TWORZENIE MODELI I POJĘCIE FUNKCJI W MECHATRONICE

Przy tworzeniu systemów i procesów mechatronicznych wybór optymalnego procesu odbywa się na podstawie badania modeli. Modele są opisami matematycznymi lub imitacjami istotnych zależności rozpatrywanego problemu, zorientowanymi na cel lub funkcję systemu. Szczególne znaczenie ma model matematyczny. Może być on przedstawiony za pomocą równań, tabel czy planów przepływu sygnałów i opisuje zachowanie się sygnałów w czasie.

Punkt widzenia, z którego opisuje się system oraz wiedza osiągnięta w ten sposób mogą być bardzo różne. Inżynier widzi na przykład pojazd w inny sposób niż ekonomista, projektant form zewnętrznych czy sprzedawca. Sam zaś inżynier z kolei używa różnych modeli, w zależności od tego, czy interesuje go wytrzymałość karoserii, komfort jazdy czy elektroniczne zarządzanie silnikiem.

Tworzenie modeli odbywa się dwoma metodami, mianowicie na:

- drodze teoretycznej,
- drodze eksperymentalnej (identyfikacja).

Tworzenie modelu na drodze teoretycznej zakładana jest znajomość systemu lub przynajmniej znajomość hipotez. Metoda ta jest preferowana dla systemów, w których możliwe jest założenie bilansów fizycznych, ekonomicznych czy innych. Przykładami mogą tu być:

- w **mechanice**: zasada pędu i popędu, zasada momentu pędu, zasada pracy czy też różne zasady wariacyjne,

- w **elektrotechnice**: podstawowe równania dla pól elektromagnetycznych (zasada przepływu pola, zasada indukcji itd.) i obwodów prądowych (prawo Ohma, prawa Kirchhoffa itd.).

Tworzenie modelu na drodze eksperymentalnej opiera się na obserwacjach, to znaczy na pomiarach. Często jest ono określane jako **identyfikacja**.

Na podstawie eksperymentów następuje określenie wartości charakterystycznych (na przykład parametrów), lub funkcji charakterystycznych (na przykład funkcji przenoszenia, transmitancji), które opisują system.

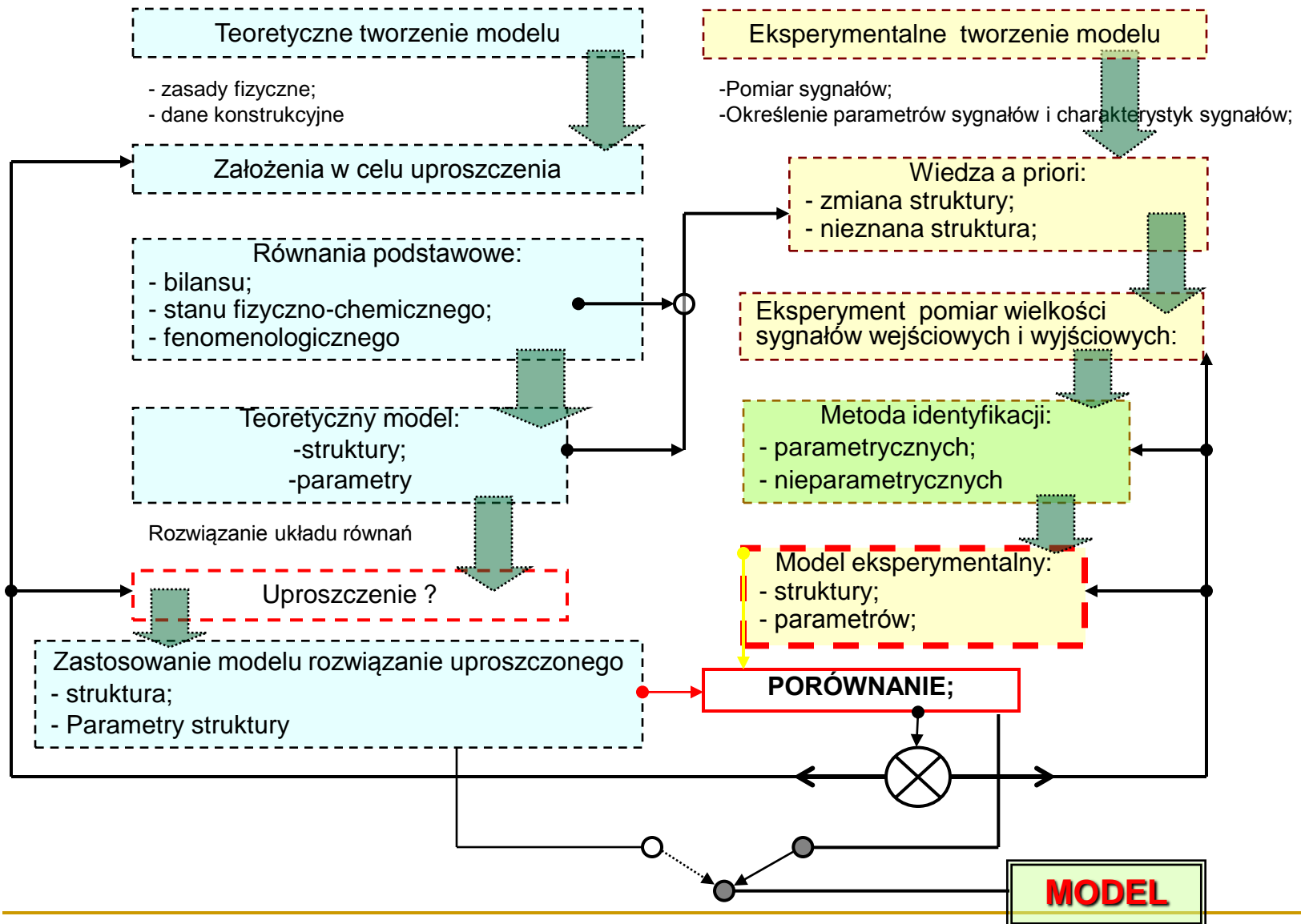
Problem upraszcza się, gdy znany jest związek wejście z wyjściem. Wtedy problem można często sprowadzić do identyfikacji parametrów.

W wielu przypadkach klucz do sukcesu tkwi w kombinacji drogi teoretycznej i eksperymentalnej. Zasadniczy sposób postępowania pokazuje rys.8. Zarówno teoretyczne, jak i eksperymentalne tworzenie modelu jest nie do pomyślenia bez wydajnej techniki obliczeniowej. Obie drogi wiodą, przez analizę sygnału i procesu, do modelu systemu, który tworzy podstawę do sterowania procesem mechatronicznym. Ingerencja w okresie projektowania w projekt procesu, określająca wielkości nastawcze w celu osiągnięcia pożądanej funkcjonalności umożliwia optymalizację systemu mechatronicznego.

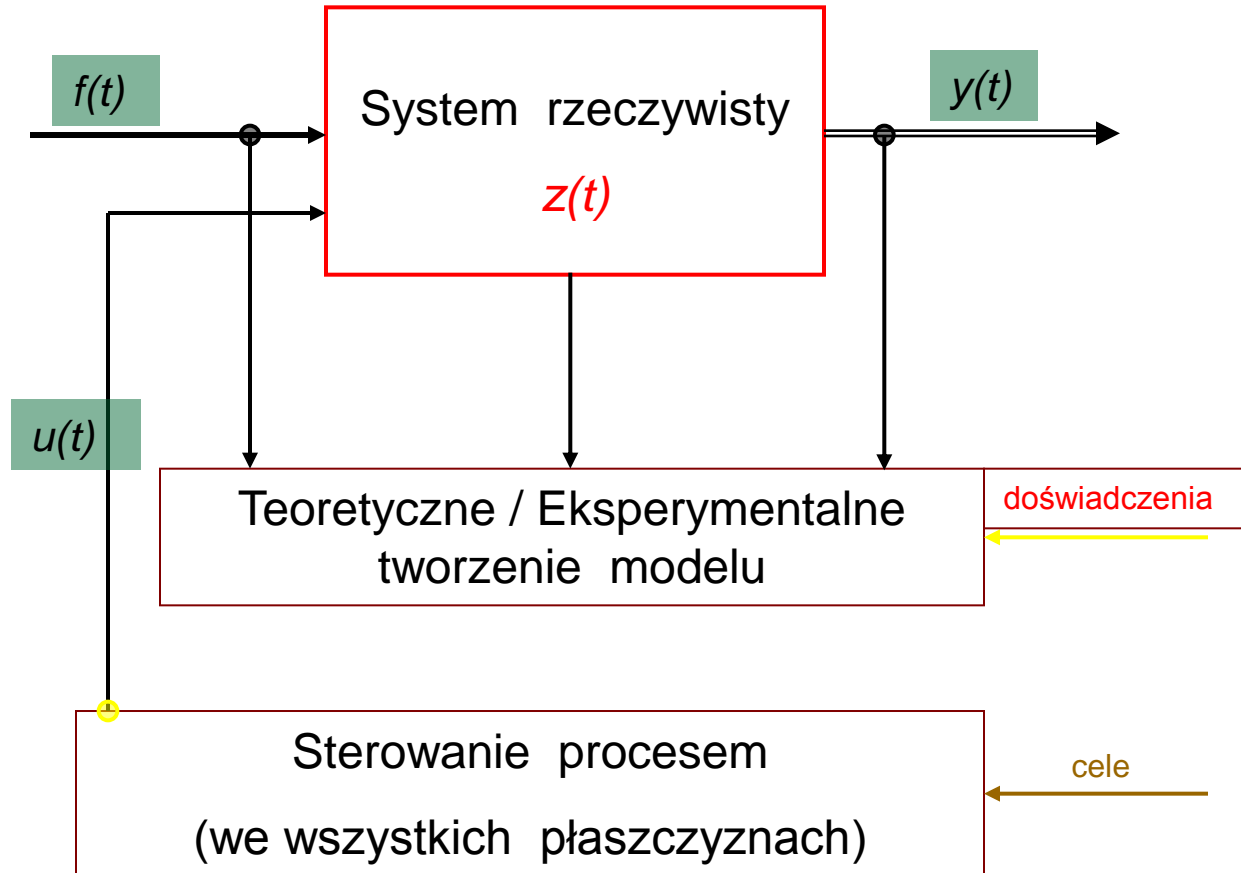
Systemy mechatroniczne charakteryzują się tym, że wzajemnie powiązane są elementy składowe (komponenty) z bardzo różniących się dziedzin techniki. Ta różnorodność uwidocznia struktura podstawowa rys. 2 i 3.

Na rys. 9 pokazana jest schematycznie zasada sterowania procesem mechatronicznym wg. uogólnionego procesu.

TWORZENIE MODELI I POJĘCIE FUNKCJI W MECHATRONICE



Rys 8. Zależność między tworzeniem modelu na drodze teoretycznej i identyfikacji



Rys 9. Zasada sterowania procesem oparta na jego modelu

Podstawowe funkcje, występujące w systemie mechatronicznym, można rozdzielić według rosnącej złożoności w następujący sposób:

- **Funkcje kinematyczne**. Przez to pojęcie należy rozumieć przygotowanie właściwego aparatu ruchowego, który spełnia wymaganą funkcję. Zadanie to przypada dziedzinie kinematyki (mechanika, dynamika maszyn, teoria maszyn i mechanizmów) i wyraża się przez geometryczny opis.

- **Funkcje kinetyczne**. Chodzi tu o uwzględnienie sił i momentów, jakie konieczne są do wykonania postawionego zadania. Problem ten może być rozważany za pomocą równań ruchu.

- **Funkcje mechatroniczne**. Chodzi tu o powiązanie sensoryki, algorytmów regulacji i aktoryki, jak również dalszych komponentów. W ten sposób opis funkcjonalny zostaje uzupełniony i skompletowany.

Do opisu ruchu systemu mechatronicznego o n stopniach swobody wprowadza się następujące pojęcia:

- *Inercjalny układ współrzędnych (KS)0 (bazowy układ współrzędnych, układ współrzędnych otoczenia, układ globalny):*

Z reguły jest to układ kartezjański i nieruchomy w przestrzeni.

W układzie tym opisuje się zadanie technologiczne.

- *Lokalny układ współrzędnych (układ związany z ciałem) (KS) k ; $k = 1, 2, \dots, N$.*

Układ ten jest sztywno powiązany z ciałem k .

W ten sposób pozycja i orientacja rozpatrywanego ciała są identyczne z pozycją i orientacją (KS) k w odniesieniu do układu inercjalnego (KS)0

- **Punkt obserwacji** (punkt efektora - **EP**):

Jest to miejsce geometryczne, którego zachowanie się (np. ruch) jest ważne dla zdefiniowanego zadania. Przy tym dopuszcza się również, że miejsce to składa się ze zbioru punktów.

- **Współrzędne globalne punktu efektora:**

Opisują one pozycję (x, y, z) i orientację (ϕ, ψ, θ) (punktu efektora w systemie inercyjnym (**KS**)).

$$x := [x, y, z, \phi, \psi, \theta]^T \in R^6 \quad (4)$$

Czasami pozycja i orientacja ujmowane są razem jako położenie.

- **Współrzędne uogólnione (generalizowane)**

$$q := [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^6 \quad (5)$$

Razem z uogólnionymi (generalizowanymi) prędkościami opisują one stany systemu

$$z := [z_1, z_2, \dots, z_m]^T = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in R^m \rightarrow m = 2n \quad (6)$$

- **Przestrzeń konfiguracji**

$$Q := \{q \mid q_{\min} \leq q \leq q_{\max}\}$$

- (7)

Przez q_{\min} i q_{\max} oznaczone są ograniczenia współrzędnych uogólnionych.

- **Przestrzeń robocza i model kinematyczny:**

$$X := \{x \mid x = f(q) \wedge q \in Q\} \quad (8)$$

Przez $x=f(q)$ opisuje się zwykle nieliniowy związek między współrzędnymi otoczenia (globalnymi) i współrzędnymi uogólnionymi. Relacja ta jest nazywana modelem kinematycznym.

- **Model kinetyczny.** Model kinetyczny może być sformułowany w przestrzeni konfiguracyjnej lub w przestrzeni roboczej. Opisuje on związek między wielkościami ruchu $q(t)$ lub $x(t)$ i wielkościami siły:

$$Q(t), \text{ lub } F(t) = [F_x(t), F_y(t), F_z(t), M_x(t), M_y(t), M_z(t)]^T$$

Na przykład w przestrzeni konfiguracyjnej model kinetyczny ma następującą postać – ogólną:

$$f[\ddot{q}(t), \dot{q}(t), q(t)] = Q(t); \quad \text{lub} \quad - M[q(t)]\ddot{q}(t) + h[q(t), \dot{q}(t)] = Q(t), \quad q(0) = q_0, \quad \dot{q}(0) = \dot{q}(0) = \dot{q}_0$$

W większości przypadków równanie (9) prowadzi do układu równań różniczkowych zwyczajnych, nazywanych równaniami ruchu.

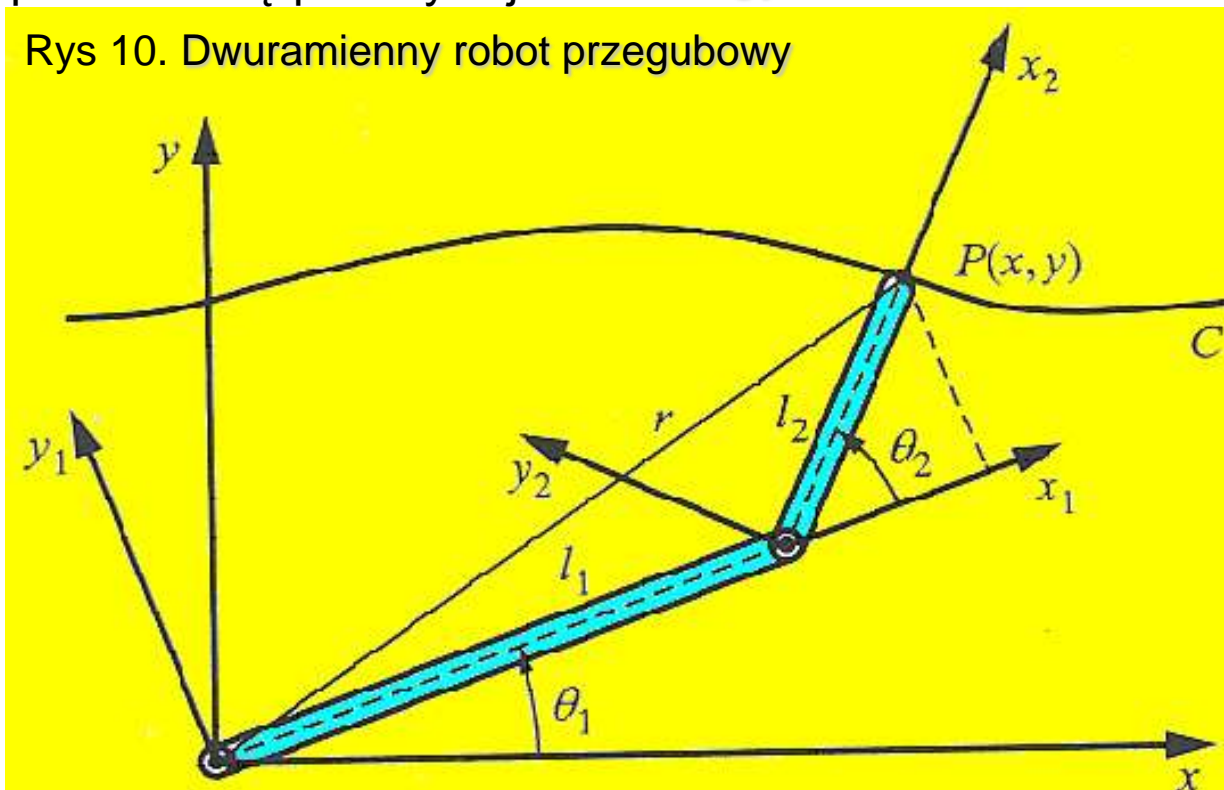
Wektorem $Q(t) \in R^n$ Opisuje się uogólnione (generalizowane) siły i momenty, a wektorem $M(q)$ – macierz bezwładności.

Dla systemów odczytujących (cyfrowych) równanie (9) może być przekształcone w układ równań różniczkowych.

PRZYKŁAD – „przestrzeń robocza dwuramiennego robota przegubowego”.

Przestrzeń konfiguracji jest dana jako: $Q = \left\{ \theta_1, \theta_2 \mid 0 \leq \theta_1 \leq \frac{\Pi}{2}; 0 \leq \theta_2 \leq \Pi \right\}$, punkt efektora P zaś powinien poruszać się po krzywej - torze – **C**.

Rys 10. Dwuramienny robot przegubowy



ROZWIĄZANIE. Układ ma dwa stopnie swobody. Przez **KiS** są oznaczone układy współrzędnych sztywno związane z ciałami. Początki tych układów znajdują się w poszczególnych osiach przegubów.

Współrzędne uogólnione: $q = [q_1, q_2]^T = [\theta_1, \theta_2]^T$

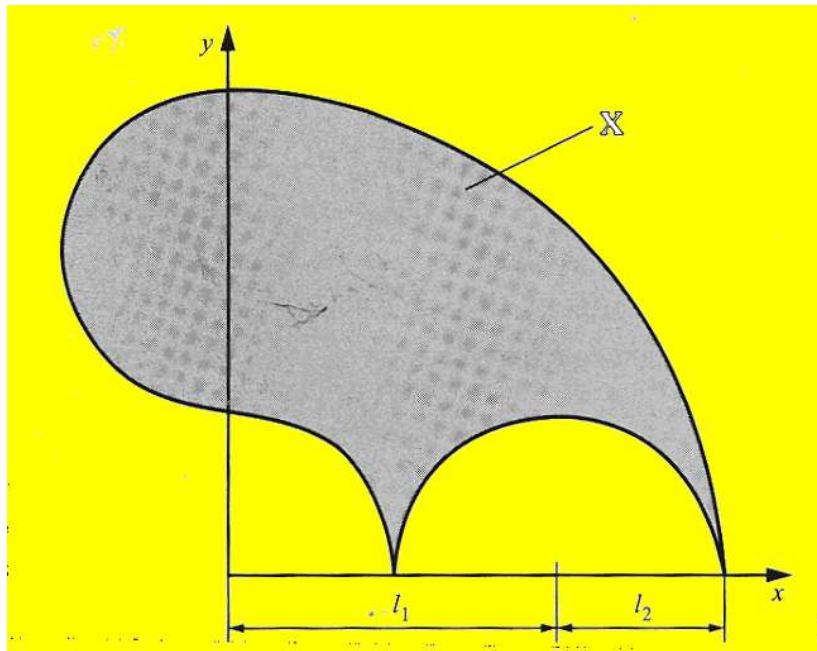
Model kinematyczny:

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2),$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2).$$

Przestrzeń roboczą otrzymuje się przez podstawienie granicznych położenia współrzędnych uogólnionych. Dla

$$l_1 = 2 \times l_2$$



Przestrzeń robocza dwuramiennego robota dwuprzegubowego

WNIOSKI.

Z przytoczonego przykładu widać że, modele kinematyczne w technice robotycznej mogą być łatwo i niezawodnie określane pod warunkiem, że przyjmie się idealne (tzn. bez luzu i bez strat) przeguby i idealnie sztywne człony.

Określenie rzeczywistych właściwości przegubu, szczególnie jego właściwości dyssypatywnych, które są uwarunkowane tłumieniem i tarciem, jest z reguły możliwe tylko eksperymentalnie przez identyfikację, w najprostszym przypadku przez identyfikację parametrów.

Jeżeli uda się opisać matematycznie systemy częściowe, nazywane także *mechatronicznymi modułami funkcjonalnymi*, to można zacząć badać cały system. Treścią tego badania może być np. ocena stabilności w otoczeniu stacjonarnych punktów pracy lub badanie sterowalności i obserwowalności. Przez etapowe modulacje w czasie można otrzymać przede wszystkim wiadomości o dynamice sterowania, na przykład o zachowaniu spowodowanym zmianą wielkości prowadzących czy wpływem wielkości zakłócających.

W nowoczesnej teorii systemów przyjęło się przedstawianie równań systemu w formie *stanu (równania stanu)*. Rozumie się przez to opis systemów dynamicznych za pomocą równań różniczkowych pierwszego stopnia o postaci

$$\dot{z}(t) = f[z(t), u(t), n(t), t], \quad z(0) = z_0 \quad (10)$$

$$y(t) = g[z(t)] \quad (11)$$

gdzie $z(t) \in R^m$ - wektor stanu, $u(t) \in R^f$ - wektor sterowania, $n(t) \in R^m$ - wektor zakłóceń, $y(t) \in R^r$ - wektor wyjścia.

Samo równanie (10) nazywane jest **równaniem stanu** lub **przedstawieniem przestrzeni stanów**. Jest ono uzupełniane o równanie wyjścia (11). Powodem tego rozróżniania jest to, że **wielkości stanów** nie zawsze są dostępne bezpośrednio, lub to, że nie interesują nas same wielkości stanu, lecz zachowanie określonych punktów obserwacji (**punkty efektora**).

Opis systemów dynamicznych w postaci przestrzeni stanów ma następujące zalety:

- Nadaje się szczególnie dobrze do badań numerycznych (istnieje obfitość numerycznych metod całkowania).
- W takim przedstawieniu systemowym została rozwinięta najnowsza wiedza z zakresu teorii systemów, jak zagadnienia sterowalności, obserwowalności, syntezy regulatorów, obserwatora stanu itd...
- Wektor stanu $z(t)$ daje się łatwo wytłumaczyć geometrycznie. Jeżeli jego współrzędne przyjmie się jako osie przestrzeni m - wymiarowej, to stworzą one przestrzeń stanów. Przebieg $z(t)$ w zależności od t tworzy trajektorię w przestrzeni stanów.

Dla systemów liniowych lub zlinearyzowanych otrzymuje się opis uproszczony.

- Linearyzacja następuje często wokół rozwiązania nominalnego (rozwiązanie zadane, takie jakie być powinno).
- Liniowe równania systemu opisują wtedy zachowanie się (w czasie) przyjętych małych odchyłeń od rozwiązania nominalnego.

Standardowa postać przedstawienia przestrzeni stanów dla systemów liniowych wygląda następująco:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= A(t) z(t) + B(t) u(t) + R(t) n(t), & z(0) &= z_0 \\ y(t) &= C(t) z(t). \end{aligned} \tag{12}$$

Obok już objaśnionych wielkości występują tu:

$A(t)$ – macierz systemu o wymiarach - $m \times m$;

$B(t)$ - macierz oddziaływania sterującego o wymiarach - $m \times f$;

$R(t)$ – macierz oddziaływania zakłócającego o wymiarach – $m \times m$;

$C(t)$ – macierz obserwacji o wymiarach – $m \times l$;

Linearyzowane równanie systemu ma bardzo duże znaczenie praktyczne, szczególnie dla badania systemów z macierzami niezmiennymi w czasie (systemy niezmiennie w czasie)⁸⁰

PROJEKTOWANIE SYSTEMÓW MECHATRONICZNYCH

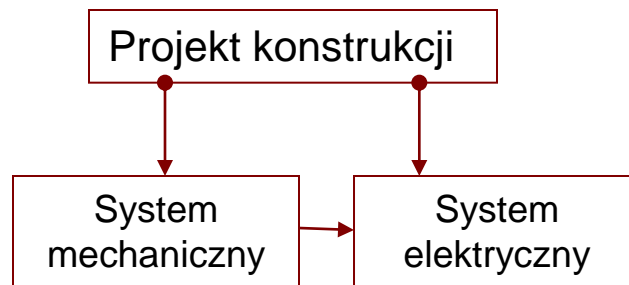
Szczególną cechą systemów mechatronicznych jest to, że systemy częściowe (komponenty), pochodzące z całkiem różnych dziedzin techniki, muszą być wzajemnie powiązane.

Duże znaczenie dla funkcjonalności systemu całościowego ma wzajemne oddziaływanie komponentów mechanicznych i cyfrowo-elektronicznych. W systemie konwencjonalnym zarówno projekt, jak i realizacja komponentów mechanicznych i elektronicznych prowadzone są niezależnie od siebie.

Projektowanie systemów mechatronicznych rozpoczyna się często od sporządzenia tego, co można nazwać studium systemu. Jest to konieczne, ponieważ zwykle istnieje wiele możliwych rozwiązań alternatywnych, które muszą być ocenione i porównane. Podczas wyboru i realizacji koncepcji ważną rolę odgrywają zarówno rozważania i modele zorientowane na funkcję, jak i zorientowane na postać konstrukcyjną.

Schematy projektowania są pokazane na rysunku 12, natomiast przeciwstawienie różnic między konwencjonalnym a mechatronicznym sposobem postępowania zawiera tablica 2

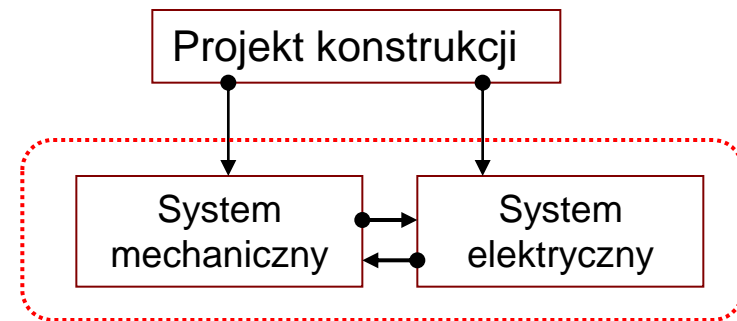
W systemie konwencjonalnym projekt i realizacja komponentów mechanicznych i elektronicznych prowadzone są dalece niezależne



Komponenty oddzielne

Rys 12a. Postępowanie konwencjonalne

System mechatroniczny cechuje się zaś tym, że - zaczynając od fazy koncepcyjnej - dąży się do przestrzennie i funkcjonalnie „zintegrowanego systemu całościowego”



Jednolita koncepcja całości

Rys 12b. Postępowanie mechatroniczne

Projektowanie systemów mechatronicznych rozpoczyna się często od sporządzenia tego, co można nazwać **studium systemu**. Jest to konieczne, ponieważ zwykle istnieje wiele możliwych rozwiązań alternatywnych, które muszą być ocenione i porównane.

Wybór i realizacja koncepcji analizowanych modeli wynika z analizy i modeli w aspekcie funkcjonalności, jak i ich postaci konstrukcyjnej

Przeciwstawienie ważnych różnic między konwencjonalnym (oddzielne komponenty) i mechatronicznym sposobem postępowania w procesie projektowania systemów zawiera tablica 2.

Tablica 2. Zasadnicze różnice między projektem konwencjonalnym i mechanicznym

Projekt konwencjonalny	Projekt mechatroniczny
- Zestawione komponenty i przez to często złożono mechanika;	- Autarkiczne jednostki, przeniesienie funkcje mechaniczne do programowania
- Precyzje przez ścisłe tolerowanie;	- Precyzja przez pomiar i sprowadzanie do stanu wymaganego;
- Sztywna konstrukcja;	- Podatna i przez to lekka konstrukcja;
- Problemy z kablami;	- Magistrale;
- Sterowany ruch;	- Programowalny ruch, regulowany ruch;
- Brak wpływu na wielkości niemierzalne;	- Obliczanie, regulacja wielkości niemierzalnych;
- Proste nadzorowanie wartości granicznej;	- Nadzorowanie z diagnozą uszkodzeń;

Modele zorientowane **na funkcję**. Muszą zawierać wymienione już funkcje podstawowe (kinematyczne, kinetyczne i mechatroniczne). Modele te służą do opisu funkcji systemu mechatronicznego. Rola geometrii i postaci jest przy tym z reguły ograniczona.

Odpowiednimi klasami modeli do rozważania różnorodnych problemów mechatronicznych okazały się regulowane układy:

- **wielociałowe** (niem. **Mehrkorpersys-teme MKS**), ang. **multibody systems**). Przez **układ wielociałowy** w najprostszym przypadku rozumie się otwarty łańcuch ciał stałych, połączonych wzajemnie przegubowo, na których ruch można wpływać aktywnie za pomocą sił nastawczych lub momentów nastawczych.

Za pomocą analizy modeli wielociałowych można, osiągnąć **modelowanie systemu bliskie rzeczywistości**. Modele te są z dobrym skutkiem stosowane dla obliczeń typu **off-line** („nie na bieżąco”) i służą do wykazania funkcjonalności, a także do badania parametrów, planowania toru, projektu regulacji itd.

Jeżeli konieczną jest systemu mechatronicznego wg. zadań techniki regulacji - **on-line** – „na bieżąco”, tzn. to znaczy modelowi systemu są stawiane wymagania definiowane jako zdolność systemu do pracy w czasie rzeczywistym.

Modele te nazywane są także modelami **RTS** (ang. **real-time systems** – „w czasie rzeczywistym”).

Modele zorientowane na postać **konstrukcyjną**. Tworzą podstawę do wykazania wytrzymałości i projektu konstrukcyjnego systemów częściowych systemu mechatronicznego. Wykorzystywane są do tego programy CAD i FEM (ang. *finite-element method*) lub powiązanie obu programów, aby osiągnąć możliwie realistyczny opis geometrii i właściwości wytrzymałościowych. Funkcjonalność systemu całościowego odgrywa w tych badaniach rolę podrzędną.

Proces projektowania ma charakter cyklicznego, sukcesywnego stosowania modeli zorientowanych na funkcję i zorientowanych na postać konstrukcyjną, z odpowiednimi narzędziami (programy MKS, FEM, CAD) do ich badania.

Przy wszystkich pracach rozwojowych znaczenie ma zarówno funkcja, jak i postać konstrukcyjna. Przy rozdzieleniu metod i sposobów postępowania można osiągnąć tylko wynik gorszy od optymalnego.

Dlatego celem projektowania jest przygotowanie takich jednostkowych i zintegrowanych narzędzi, które w jednakowym stopniu uwzględniają funkcję i postać konstrukcyjną.