

Politechnika Białostocka
Rozprawy Naukowe Nr 103

Marek Gawrysiak

ANALIZA SYSTEMOWA URZĄDZENIA MECHATRONICZNEGO



Wydawnictwo Politechniki Białostockiej
Białystok 2003

**Wydanie publikacji sfinansowano w ramach
grantu KBN 7 T07C 001 19**

RECENZENCI:

prof. dr hab. inż. Bogdan Branowski
prof. zw. dr hab. inż. Józef Giergiel

OPRACOWANIE REDAKCYJNE:

Jadwiga Żukowska

© Copyright by Politechnika Białostocka 2003

ISSN 0867–096X

Publikacja nie może być powielana i rozpowszechniana, w jakikolwiek sposób,
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

Opracowanie graficzne, skład i druk:
Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej

PRZEDMOWA

*Nauka wynajdzie, przemysł zastosuje, człowiek się adaptuje*¹
Hasło wystawy światowej w Chicago w roku 1933

Człowiek zaproponuje, nauka przebadana, mechatronika się adaptuje
Odpowiednik tego hasła w roku 2003

Tradycyjne dyscypliny nauk technicznych, jak budowa maszyn, elektrotechnika czy budownictwo, a także elektronika, automatyka i informatyka, zwykle koncentrują się bardzo mocno na własnych, specjalistycznych zagadnieniach. Tak mocno, że często nie są w stanie przekroczyć granic swego zakresu i zająć się ogólnymi zagadnieniami techniki. Dyscypliny te orientują się przede wszystkim na matematykę i nauki przyrodnicze a prawie wcale na nauki społeczne, nie mówiąc już o filozofii. Dlatego brakuje im odpowiedniego całościowego obrazu techniki. Lukę tę starają się wypełnić nowe, uogólniające podejścia do techniki, które zapowiadają zmianę paradygmatu w technice i naukach technicznych. Najważniejszym z tych podejść wydaje się mechatronika.

Skąd się wzięła ta książka?

Z inspiracji i przemysłów dotyczących mechatroniki jako nowej kultury technicznej, która coraz szerzej zastępuje działania człowieka. Z faktu, że prawie każde nowoczesne urządzenie techniczne jest urządzeniem mechatronicznym; że technika, w której dziś żyjemy, staje się techniką mechatroniczną; że tak szybko postępujące technizowanie ludzkiej pracy odbywa się dziś głównie środkami mechatronicznymi; że mechatronika staje się zjawiskiem technicznym o ogromnym znaczeniu pozatechnicznym.

Po co ta książka?

Żeby pokazać jak mechatronika staje się techniką ogólną – swego rodzaju meta-techniką, która pod jeden dach sprowadza klasyczne dyscypliny techniczne: budowę maszyn, elektrotechnikę, automatykę, elektronikę i informatykę; żeby ułatwić porozumiewanie się specjalistów tych dyscyplin w zakresie zagadnień technicznych i pozatechnicznych. Problem bowiem polega na tym, że przez pojęcie mechatroniki każdy rozumie coś innego – coś odniesionego do dyscypliny własnej. Byłoby czymś bardzo prostym, gdyby mechatronikę rozumiano jako podejście nauk technicznych, za którego pomocą można rozwijać inteligentne, innowacyjne produkty o wyższych osiągnięciach w stosunku do produktów istniejących. Im większe i bardziej złożone stają się urządzenia techniczne, tym mocniej klasyczny inżynier-specja-

¹ NORMAN D. A. Grandeur et misère de la technologie. *La Recherche*, No 285, Mars 1996 p. 22-26.

lista napotyka swoje granice; zmuszony jest usiąść przy jednym stole z innymi specjalistami, aby wykorzystać ich wiedzę. Myślenie i działanie w zespole różnych specjalistów jest więc podstawowym warunkiem mechatroniki.

W samochodzie osobowym, obok części i napędów mechanicznych, mamy dziś ponad 100 napędów elektrycznych, hydraulicznych lub pneumatycznych i około 50 mikroprocesorów. Końca tego rozwoju nie widać. Pozostawienie tych zadań tylko „czystemu” mechanikowi, elektronikowi, czy informatykowi niewiele pomoże. Powinni oni pracować w zespole i umieć porozumiewać się. Informatyk i elektronik powinni znać podstawową wiedzę z zakresu budowy maszyn; dopiero wtedy można bowiem w zespole racjonalnie decydować i oceniać wspólne pomysły i rozwiązania. Wiedzę specjalistyczną należy przetworzyć w wynik pracy zespołu. Między oddziałami i instytucjami w przemyśle czy w szkolnictwie wyższym właśnie w tym punkcie istnieją spory kompetencyjne, bo, jak się okazuje, wszystkie z nich uprawiają mechatronikę. Te bariery należy zlikwidować. Potrzebny jest wspólny język mechatroniki. Książka jest próbą pójścia w tym kierunku.

Czym jest ta książka?

Próbą innego, nowego spojrzenia na mechatronikę i urządzenia mechatroniczne. Spojrzeniem bardziej ogólnym i wieloaspektowym niż te, których źródłem jest najbardziej chyba popularna definicja mechatroniki jako synergii klasycznych dziedzin techniki. Chodzi mi nie tylko o pokazanie technicznych, ale również społecznych i innych pozatechnicznych aspektów mechatroniki. Dlaczego wydają mi się one ważne? Powód jest prosty: mechatronika staje się nośnikiem funkcji zastępujących w coraz większym stopniu funkcje pracy człowieka. Mechatronika pozwala sztucznie wytwarzać przedmioty zastępujące te rodzaje ludzkiego działania, które jeszcze niedawno uważano powszechnie za nie do zastąpienia. Mam tu na myśli przede wszystkim rutynowe, powtarzalne umysłowe działania człowieka, polegające na wnioskowaniu logicznym, które coraz szerzej przekazuje się urządzeniu mechatronicznemu. Nigdy w historii rozwoju urządzeń technicznych proces wnioskowania logicznego człowieka i jego skutki w postaci działań fizycznych nie były tak szybko przekazywane urządzeniu technicznemu. Umożliwił to rozwój elektroniki i opartej na niej techniki komputerowej.

Jako próba pokazania obszernego rozumienia mechatroniki i techniki książka nawiązuje do poprzednich książek autora o mechatronice i edukacji metatechnicznej [GAWRYSIAK 1997, 1998].

Dlaczego analiza systemowa?

Powody są trzy:

1. W mechatronice słowo „system” jest używane powszechnie. Tak powszechnie, że często funkcjonuje ono jako pojęcie i nazwa bez wyraźnego określenia treści i granic. Dlatego warto się przyjrzeć bliżej temu, co nazywa się systemem mechatronicznym.

2. Urządzenia mechatroniczne stają się coraz bardziej wielofunkcyjne, coraz bardziej zintegrowane i zawierają hierarchiczną architekturę „systemu systemów”. Analiza systemowa może ułatwić powstawanie takich urządzeń. Choć pojęcie systemu ma często negatywną domieszkę modnego słowa, metody inżynierii systemowej stosuje się jednak z powodzeniem w różnych dziedzinach nauki i techniki. Istotny postęp w wielu dziedzinach techniki stał się możliwy dzięki użyciu środków jakie oferuje właśnie inżynieria systemowa. Sama inżynieria systemowa nie jest dyscypliną inżynierską. Jest ona raczej techniką w sensie czynnościowym; techniką stosowania wiedzy inżynierskiej z różnych dyscyplin inżynierskich i nauk przyrodniczych w celu skutecznego rozwiązania złożonego, wieloaspektowego problemu inżynierskiego².
3. Istnieje bardzo ciekawa systemowa teoria techniki, opracowana przez niemieckiego inżyniera i filozofa G. ROPOHLA [1979, 1999]. W całościowy sposób przedstawia ona istotę techniki z różnych perspektyw poznawczych. Czyni to przy tym w sposób bardzo przystępny, na pierwszym planie stawiając konkretny opis słowny i rysunkowy, a nie abstrakcyjny, często zniechęcający symboliczny opis teoriomnogościowy. Na jej podstawie można zbudować przystępną systemową teorię techniki mechatronicznej, która może być szkieletem ułatwiającym rozumienie, projektowanie i użytkowanie urządzeń mechatronicznych.

Dla kogo jest ta książka?

Dla tych wszystkich, którzy chcą zrozumieć nowoczesne urządzenia techniczne. Nie tylko dla studentów kierunków technicznych i praktykujących inżynierów, którzy szukają ogólnej orientacji w zakresie nowoczesnej techniki, ale również dla studentów i absolwentów kierunków nietechnicznych, którzy chcą zrozumieć zjawisko coraz szerszego uprzedmiotowienia pracy człowieka przez urządzenia mechatroniczne i jego dwa najbardziej widoczne, przeciwstawne skutki: ulżenie pracy i bezrobocie.

² porównaj hasło *System engineering* w www.britannica.com

1 Spis treści

1. Wprowadzenie	11
Trendy rozwojowe i problemy mechatroniki	11
Cele książki	14
Dwa dominujące podejścia do mechatroniki	15
Podejście komponentowe	15
Podejście interakcyjne i paradygmat oprogramowania	16
Pojęcie mechatroniki i urządzenia mechatronicznego	18
Technika mechatroniczna, inżynieria mechatroniczna, technologia mechatroniczna	19
Urządzenia mechatroniczne	20
Wymiary i perspektywy poznawcze mechatroniki	21
Perspektywa techniczna	21
Perspektywa biologiczna	22
Perspektywa ludzka (antropologiczna)	23
Perspektywa społeczna	24
Synteza interdyscyplinarna	25
Układ książki	26
2. Przykład wprowadzający	28
Opis techniczny	28
Opis socjotechniczny	37
Podsumowanie	39
3. Systemowa teoria techniki	41
Koncepcje, pojęcia i znaczenie ogólnej teorii systemów	41
Trzy koncepcje teorii systemów	41
Definicja systemu	43
Pojęcie funkcji	43
Relacje, sprzężenia, otoczenie	45
Chaos, synergetyka, samoorganizacja	46
Pojęcie informacji	46
Znaczenie teorii systemów	47
Systemy działaniowe	49
Pojęcie, funkcja, struktura zgrubna	49
Struktura dokładna	51
Ludzkie systemy działaniowe i ich hierarchia	53
Systemy rzeczowe	54
Pojęcie i hierarchia	54
Funkcje	55

Struktury	57
Klasyfikacja	57
Systemy socjotechniczne	59
Społeczny podział pracy	59
Socjotechniczny podział pracy	60
Integracja społeczna	63
Systemy celów	63
Pojęcie i struktura	63
Problem cel-środek	66
Użytkowanie systemów rzeczowych	68
Struktura przebiegu użytkowania	68
Identyfikacja socjotechniczna	71
Integracja socjotechniczna i zasady technizacji	72
Warunki i skutki	75
Socjalizacja techniczna	76
Powstawanie systemów rzeczowych	77
Pojęcie rozwoju technicznego	77
Okresy historii techniki	78
Fazy ontogenezy technicznej	81
Wynalazek jako pomysł użytkowy	82
Intuicjonistyczna koncepcja wynalazku	84
Racjonalistyczna koncepcja wynalazku	85
Model genezy techniki	91
Opis matematyczny	93
System	93
System działaniowy	98
Ludzki system działaniowy	100
System rzeczowy	101
System socjotechniczny	103
System celów	104
4. Modele systemowe mechatroniki	106
Mechatroniczny system działaniowy	106
Działanie a mechatronika	106
Pojęcie mechatronicznego systemu działaniowego i jego funkcje	107
Struktura mechatronicznego systemu działaniowego	109
Mechatroniczny system rzeczowy	115
Pojęcie i hierarchia	115
Funkcje	117
Struktury	120
Podsumowanie	128
5. Powstawanie urządzenia mechatronicznego	130
Perspektywa historyczna	130
Od regulatora odśrodkowego do automatyzacji mechanicznej	131

Narodziny mikroprocesora i mechatroniki	132
Przykłady ewolucji mechatronicznej	134
Rozwój konstrukcji samochodu jako systemu mechatronicznego	134
Od hamulca mechanicznego do mechatronicznego	137
Podsumowanie	138
Pojęcie rozwoju mechatronicznego	138
Ontogeneza i fitogeneza mechatroniczna	138
Rozwój mechatroniki jako etap technizowania pracy	140
Czego oczekujemy od urządzeń mechatronicznych?	142
O inteligencji mechatronicznej	142
O autonomii	143
Perspektywy rozwoju urządzeń mechatronicznych	144
Wymagania stawiane urządzeniom mechatronicznym	146
Cele i granice rozwiązań mechatronicznych	148
Główne cechy projektowania mechatronicznego	149
Dążenie do synergii	149
Kluczowa rola sterowania	156
Modele projektowania mechatronicznego	160
Integracja modeli domenowych	160
Modele z techniki robotycznej	166
Projektowanie mechatroniczne jako problem syntezy	173
Projektowanie elektroniczne w środowisku mechatronicznym	176
Podsumowanie 1: Etapy projektowania urządzeń mechatronicznych	179
Podsumowanie 2: Projektowanie mechatroniczne jako system działaniowy	184
6. Użytkowanie urządzenia mechatronicznego	186
Problem zastępowalności człowieka	186
Punkt widzenia antropologii filozoficznej	188
Problem semantyki wyrażen etycznych i technicznych	188
Inteligencja ludzka, a inteligencja sztuczna	189
Punkt widzenia etyki	191
Naturalność	191
Autonomia i zakaz instrumentalizacji	192
Punkt widzenia filozofii kultury	193
Praktyka kulturowa, a rozwój robotyki i mechatroniki	193
Mechatronika jako kultura techniczna	194
Mechatronika jako działanie człowieka	196
Podsumowanie	198
7. Podsumowanie	199
8. Literatura	202

1. Wprowadzenie

Trendy rozwojowe i problemy mechatroniki

W ostatnim ćwierćwieczu XX wieku rzeczywisty koszt jednostki mocy elektronicznej techniki obliczeniowej obniżył się ponad 10 000 razy. Bezpośrednim tego skutkiem był nie tylko ogromny wzrost zastosowania elektroniki w najróżnorodniejszych urządzeniach technicznych, ale także narodziny i fascynujący rozwój interdyscyplinarnego i multidyscyplinarnego obszaru nauki i techniki, który nazywamy mechatroniką.

Ogromna większość produkowanych mikroprocesorów, tak zwane mikrokontrolery, nie znajduje zastosowania w komputerach. Stanowi część innych urządzeń technicznych, takich jak samochody, samoloty, domy, sterowania maszyn, satelity, telefony komórkowe, pralki, automaty do gry czy kamery. Szacuje się, że w roku 2000 wyprodukowano około 150 milionów mikroprocesorów do komputerów i ponad 7 miliardów mikrokontrolerów. Mikrokontrolery stanowiły więc ponad 90% wszystkich procesorów. Temu fascynującemu rozwojowi techniki mikroprocesorowej towarzyszy równocześnie większa wydajność, miniaturyzacja i dyspozycyjność innych komponentów do konstrukcji urządzeń mechatronicznych: silników, przekładni, baterii, połączeń, sensorów itp.

Obserwujemy coraz większą „mechatronizację” klasycznych systemów technicznych. Samoloty, statki i satelity od dawna mają już autopiloty. W samochodach osobowych pracuje się intensywnie nad wspomaganiami zmysłów kierowcy w krytycznych dla niego sytuacjach. Oznacza to, że samochody za kilka lat mogą stać się robotami mobilnymi. Również w tym kierunku rozwijają się urządzenia techniki procesowej i technika domowa. Maszyny, urządzenia, aparaty i instalacje spostrzegają swoje otoczenie, mają elastyczny „magazyn sposobów zachowania”, mogą się dopasowywać do zmieniających się warunków otoczenia, podejmują decyzje na podstawie kilku opcji działania i na koniec wykonują działanie.

Z informatyki w mechatronice uczestniczą takie obszary jak np. systemy czasu rzeczywistego, systemy rozproszone, hardware-software-codesign, architektura komputerów i sztuczna inteligencja. Przez sztuczną inteligencję powstają wtedy powiązania z naukami o poznaniu (kognitywistyka) i biologią. Mechatronika i jej produkty – urządzenia mechatroniczne – wydają się soczewką, która skupia i katalizuje różne dyscypliny nauki i techniki, działające dotychczas raczej niezależnie od siebie.

W najbliższych latach dojdzie prawdopodobnie do często przepowiadanej elastyczności urządzeń przez „inteligencję multisensorową”. Urządzenia mechatroniczne pracują w coraz większej interakcji ze zmieniającym się otoczeniem. W ten sposób w centrum zainteresowań przesuwana się stary problem: Czy i jak można przygotować sensomotoryczne i kognitywne możliwości dla platform mechatronicznych, aby

powstał system techniczny działający coraz bardziej autonomicznie? Rolę zaczyna odgrywać również to, czy urządzenie mechatroniczne w zależności od ciągle zmieniających się sytuacji otoczenia – uwolnione od kontroli człowieka – nie tylko pracuje zgodnie z celem, ale czy zewnętrzny obserwator może rozpoznać te sposoby zachowania systemu, które nie zostały wyraźnie podane podczas jego konstrukcji. Wynika stąd, że wiedza nauk kognitywistycznych może mieć bezpośrednie konsekwencje dla systemów technicznych.

Główne obszary badawcze mechatroniki można podzielić na dwie grupy: (1) badania ukierunkowane na produkt mechatroniczny i (2) badania zorientowane na proces projektowania i wytwarzania produktów mechatronicznych (tabela 1). Wśród tych drugich niezwykle ważny staje się rozwój interdyscyplinarnego podejścia do projektowania, często po prostu utożsamianego z mechatroniką czy projektowaniem mechatronicznym [UHL 1999, GIERGIEL, HENDZEL, ŻYLSKI 2002]. Nie jest to zadanie łatwe. Próby osiągnięcia większej integracji w poprzek dyscyplin prowadzą bowiem często do rosnącej rozbieżności metod i narzędzi.

Dotychczasowe, specyficzne metody projektowania w mechanice, automatyce, elektronice i informatyce opierają się na specyficznym dla dziedziny świecie pojęć, na specyficznych doświadczeniach nabytych przez dziesiątki lat oraz na specyficznych metodach i środkach opisu. Doprowadziło to w wielu dziedzinach do specyficznego sposobu myślenia konstruktorów, a w praktyce przemysłowej do odpowiedniej funkcjonalnej struktury organizacyjnej. Wychodząc z tej struktury, w praktyce przemysłowej często próbuje się za pomocą podobnego sposobu myślenia i takiej samej struktury organizacyjnej rozwijać urządzenia mechatroniczne. Konstruktorzy jednej z dziedzin określają w znacznym stopniu sposób postępowania i rozdzielają konieczne, ze swego punktu widzenia, zadania i problemy na grupy konstruktorów z innych dziedzin, bez wczesnego i integracyjnego uwzględnienia możliwości innych dyscyplin fachowych. Jest to mentalność typu „ja”. Wynikiem takiego postępowania są produkty optymalizowane częściowo, powstające przez żmudne, czasochłonne i kosztowne dochodzenie do rozwiązania końcowego. Nie wykorzystuje się potencjału koncepcji systemowej, ukazującej korzyści pozadyscyplinowe. Próby wczesnego modelowania urządzenia mechatronicznego skazywane są na niepowodzenie często z powodu braku sformalizowanego opisu lub braku środków opisu wykraczających poza daną dyscyplinę. A urządzenia mechatroniczne stają się coraz bardziej złożone. Ich dynamiczne zachowanie bierze się ze wzajemnego powiązania wyspecjalizowanych komponentów mechaniki, hydrauliki, pneumatyki, elektryki, elektroniki, automatyki i informatyki. Jeżeli do projektowania takiego urządzenia podchodzi się w sposób tradycyjny, sekwencyjny, to zachowanie urządzenia i użyteczność przyjętego rozwiązania koncepcyjnego można potwierdzić dopiero w późnej fazie projektowania. Wtedy jednak niewielkie zmiany konstrukcyjne są bardzo kosztowne.

Tab. 1. Główne obszary badawcze w mechatronice [GRABOWSKI i inni 1998]

Badania ukierunkowane na produkt	Badania ukierunkowane na proces
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Znajdowanie nowych modułów ▪ Znajdowanie lepszych struktur produktu ▪ Projektowanie innowacyjnych produktów ▪ Określanie warunków granicznych dla praktycznej implementacji 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rozszerzenie teorii projektowania produktów mechatronicznych <ul style="list-style-type: none"> – proces projektowania – metody znajdowania modułów ▪ Opracowywanie nowych narzędzi wspierających rozwój <ul style="list-style-type: none"> – modele produkcji – platformy integracji

Klasyczne metody projektowania inżynierskiego nie wystarczają do racjonalnego projektowania urządzeń mechatronicznych. Główne powody są dwa: *zmieniają się obiekty projektowania i zmieniają się narzędzia projektowania*. Obiekty rozważane w klasycznych metodach projektowania są zwykle artefaktami jednodyscyplinowymi (mechanicznymi, elektronicznymi), podczas gdy coraz bardziej popularne urządzenia mechatroniczne są obiektami wielodyscyplinowymi. Klasyczne podejścia do projektowania nie radzą sobie z multidyscyplinarną wiedzą inżynierską, która jest dziś istotna w warunkach konkurencji na rynku. Dzisiejszy inżynier w swej w codziennej pracy projektowej używa coraz więcej oprogramowania. Od edytora tekstu do inżynierskiej bazy danych, od 2D/3D CAD do analizy metodą elementów skończonych. Poprawia to nie tylko skuteczność pracy, ale zmienia również sposób pracy inżyniera. Dlatego poszukuje się nowych rozwiązań integrujących modelowanie systemu mechatronicznego. Z koncepcji integrujących na uwagę zasługują: integrowanie na płaszczyźnie oprogramowania komponentów systemu [KOCH 2000], oparcie się na oprogramowaniu komputerowym integrującym wiedzę różnych ekspertów [Schemebuilder© Mechatronics], wykorzystanie języków inżynierii oprogramowania [MROZEK 2002] czy podejście inżynierii współbieżnej nazywane kompilatorem mechatronicznym [van BRUSSEL H. i inni 2001]. Przy tym należy pamiętać o tym, że podczas syntezy produktów mechatronicznych ważna jest nie tyle integracja nowoczesnych metod analizy (narzędzia CAD), ile rozumienie i doświadczenie konstruktora (CORVES 2002).

W projektowaniu urządzeń mechatronicznych spotykamy się z wieloma wzajemnie sprzecznymi zadaniami, warunkami brzegowymi i sposobami rozwiązania. Brakuje niezawodnych narzędzi, aby z tej pogmatwanej sytuacji wyfiltrować jasne cele projektowe (zorientowane całościowo) uwzględniające wszystkie warunki. Postępowanie dotychczasowe, w którym zwykle cele całkowite ustala zespół specjalistów, zbyt mocno zależy od składu zespołu. Efektem są niezbyt jasne cele całkowite, przez co oczywiście cierpi skuteczność projektowania. Potrzeba jest więc wiedzy, która pomoże systematycznie wprowadzić całościowy (holistyczny) porządek w złożone zadania mechatroniczne. Wiedzy, której posiadacz, w porównaniu do *inżyniera-specjalisty*, mógłby się czuć *inżynierem-systemistą* [RIEGER 1997]. Różnice między postępowaniem tych inżynierów byłyby podobne do różnicy między puzzle (specjalista) a hologramem (systemista): hologram w swoich częściach zawie-

ra całość. Jeżeli dysponujemy fragmentem obrazu holograficznego, to zawsze dostrzeżemy całość tego obrazu, ale będzie on mniej ostry. Natomiast każdy fragment puzzle ma taką samą ostrość, ale pokazuje tylko to, co na nim jest. Jeżeli brakuje jakiegoś fragmentu, to całkowicie brakuje tego aspektu obrazu. Istotę puzzle da się rozpoznać tylko wtedy, gdy wszystkie jej części istnieją i są odpowiednio uporządkowane.

Problemem staje się więc *postępująca specjalizacja*. W efekcie dysponujemy coraz bardziej potężną wiedzą całkowitą, której szczegółów jeden człowiek nie jest w stanie pojąć. Krótko mówiąc – rozumiemy „coraz więcej o czymś, co jest coraz mniejsze”. Dlatego obszerniejsze, złożone zadania można dziś stawiać i rozwiązywać tylko we współpracy specjalistów od różnych dyscyplin. Pojęcie dyscypliny należy tu rozumieć bardzo szeroko, globalnie. Oprócz różnych dyscyplin technicznych ważne są, a czasem decydujące, inne dyscypliny i perspektywy: ludzka, społeczna, gospodarcza, prawna, polityczna, publiczna, edukacyjna, konsumencka itp. Perspektywa specjalisty jest zwykle ograniczona, ale bardzo szczegółowa. Skutek: cząstkowe aspekty złożonego problemu i jego rozwiązania nie „maszerują” w tym samym kierunku ku celowi ogólnemu; regułą staje się *absolutyzowanie reprezentowanej specjalistyczności*, nadmierne podkreślanie aspektów drugorzędnych i sprzeczność wymagań. Nadchodzi niebezpieczeństwo „uduszenia się” rosnącą specjalizacją, bo wymagania detaliczne stają się coraz większe, rozumienie zaś całości coraz mniejsze. Typowe zachowanie się specjalisty – widzenie szczegółów – stoi nawet w sprzeczności do zadania jakim jest objęcie całości i jej oszacowanie. Nie dziwi więc nikogo, że kwalifikacje zespołu specjalistów do zadań wykonawczych nie dają się przenieść na ich kwalifikacje do znajdowania celu ogólnego.

Potrzebna jest więc, jak to celnie ujmuje NATKE [2001], specjalizacja bez izolacji. Ale jak to osiągnąć? Jednym z racjonalnych rozwiązań wydaje się myślenie w kategoriach systemowych, które oferuje całościowe podejście dla wszystkich dyscyplin.

Cele książki

Ogólnym celem książki jest opracowanie *holistycznego, ponaddyscyplinowego podejścia* do analizowania i syntezy urządzeń mechatronicznych. Chodzi przede wszystkim o pokazanie możliwości uogólnionego i ujednoliconego (w sensie ujednoliconych reguł) opisywania urządzeń mechatronicznych o dowolnym stopniu złożoności oraz łatwiejsze rozpoznawanie dróg prowadzących do ich racjonalnego projektowania.

Pierwszy cel szczegółowy ma charakter *interdyscyplinarny*. Dotychczasowa wiedza o urządzeniach mechatronicznych jest głównie wiedzą warsztatową z różnych obszarów techniki (budowa maszyn, elektronika, technika komputerowa, automatyka). Wiedza ta jest silnie dyscyplinowa, rozproszona i mało spójna. Chodzi o to, aby – korzystając ze zdobyczy analizy systemowej, a szczególnie systemowej teorii techniki, opracowanej przez G. ROPOHLA³ – wiedzę tę uzupełnić o bardziej ogólną wiedzę formalną. Ta ostatnia służyłaby nie tylko bardziej precyzyjnemu

³ Przystwojenie polskiemu czytelnikowi tej teorii traktuję jako jeden z pośrednich celów tej książki.

opisowi urządzeń mechatronicznych, lecz także byłaby swego rodzaju wspólnym językiem znacznie ułatwiającym porozumienie się specjalistów.

Drugi cel szczegółowy ma charakter *metodologiczny*. Chcę opracować *globalny opisowy model urządzenia mechatronicznego i techniki mechatronicznej*. Chcę technikę mechatroniczną potraktować jako zjawisko całościowe. A to dlatego, że poszczególne jej problemy można właściwie oszacować dopiero wtedy, gdy istnieje obszerny, całościowy szkielet orientacyjny, w którym te problemy dadzą się umieścić. Szkielet ten nie może mieć charakteru wyłącznie technicznego, ponieważ mechatronika przejmując coraz szerzej funkcje pracy człowieka. Innowacją staje się mechatronizowanie funkcji pracy człowieka. Oznacza to, że projektowanie nowych urządzeń mechatronicznych powoduje uprzedmiotawianie działań człowieka. Dlatego urządzenie mechatroniczne nie jest tylko czystym zbiorem przedmiotów (systemem rzeczowym); jest ono również zbiorem przejętych czynności ludzkich (systemem działaniowym) a więc systemem socjotechnicznym. Celem naukowym tej książki jest nie tyle analiza funkcji i struktur poszczególnych urządzeń mechatronicznych, ile raczej próba określenia pewnego socjotechnicznego schematu heurystycznego, który ułatwiłby poszukiwanie, analizowanie i syntezywanie funkcji i struktur wszystkich możliwych urządzeń mechatronicznych. Stawiam tu tezę, że podejście socjotechniczne ułatwia racjonalne projektowanie urządzeń mechatronicznych.

Na koniec chodzi mi też o *cel dydaktyczny* i to w najszerszym sensie. Nazwałbym to, nieco pompatycznie, oświeceniem mechatronicznym: Systemowy model opisywany techniki mechaniki mechatronicznej może pomóc wprowadzić porządek i ułatwić rozumienie służące zarówno działaniu indywidualnemu jak i zespołowemu. Chciałbym osiągnąć to, co oczywiście można określić jako *rozumienie mechatroniki*, ponieważ oznacza to zarówno wspólne widzenie różnorodności zjawisk w jedności urządzenia mechatronicznego jak i ich wyodrębnienie danego zjawiska z tysięcy innych zjawisk.

Dwa dominujące podejścia do mechatroniki

Jedną z najważniejszych cech mechatroniki jest integrowanie różnych technik. Integracja ta może przebiegać jednak różnie. W punkcie tym chciałbym scharakteryzować dwa podstawowe podejścia do integracji w mechatronice: tak zwane podejście podsystemowe lub komponentowe oraz podejście, które można nazwać podejściem interaktywnym i związany z nim paradygmatem oprogramowania. Pomocze to nam zorientować się w wyzwaniach, jakie stoją przed twórcami urządzeń mechatronicznych.

Podejście komponentowe

Inżynieria systemów i produktów mechatronicznych w przemyśle samochodowym, obrabiarkowym czy lotniczym stosuje zwykle w odniesieniu do mechatroniki podejście, które *opiera się na podsystemach (komponentach)*. Jest to strategia rozwoju produktu, w której zintegrowane systemy końcowe buduje się z technik jedno-

rodnych podsystemów (mechanika, elektronika, automatyka, oprogramowanie). Te podsystemy opracowuje się współbieżnie, ze szczególnym uwzględnieniem ich interfejsów. Dopiero gdy interfejsy są zaprojektowane, każdy komponent projektuje się dotychczasowym tradycyjnym sposobem. Oznacza to, że punkt ciężkości spoczywa na multidyscyplinarnym porozumieniu się inżynierów o różnej specjalności w celu właściwego zdefiniowania interfejsów.

W podejściu komponentowym nie istnieje żadna potrzeba opracowania jakiejś nowej techniki jako wyniku ściślejszej integracji z pozostałymi technikami, np. ściślejszej integracji automatyki z informatyką. Osiągi systemu mechatronicznego są tu raczej wynikiem poprawnej integracji technik istniejących. W literaturze mechatronicznej podejście komponentowe dominuje. Książki mechatroniczne poświęcają zwykle pierwszy rozdział zdefiniowaniu mechatroniki, a pozostałe rozdziały poszczególnym komponentom, takim jak, sensory, akty (człony wykonawcze), sterowanie, sprzęt komputerowy, interfejsy, komunikacja, modelowanie itp.

Podejście komponentowe jest ciągle znaczącym krokiem w stosunku do czasów, gdy mechanicy najpierw konstruowali system mechaniczny, który następnie był przekazywany automatom w celu zrobienia projektu sterowania; w tym samym czasie system komputerowy był projektowany przez elektryków a na koniec programistom dawano niemożliwe do wykonania zadanie zaprojektowania i implementacji złożonego sterownika do nieprzystosowanej konstrukcji mechanicznej i zbyt wolnego systemu komputerowego.

Podejście interakcyjne i paradygmat oprogramowania

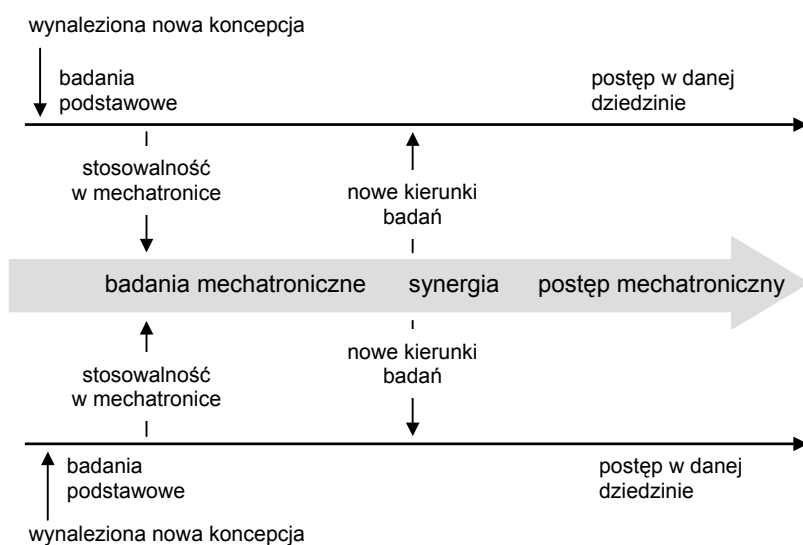
Postęp w elektronice cyfrowej stworzył nowe możliwości rozwoju systemów, których podstawą są komponenty mechaniczne. Możliwości te dotyczą przede wszystkim ogromnego wzrostu przepływu informacji, który może być wykorzystany do pożądanego sterowania komponentami mechanicznymi. Można powiedzieć, że nastąpiła zmiana paradygmatu w projektowaniu tych komponentów. Polega ona na tym, że funkcje systemu nie są już fizycznie wbudowane w komponent mechaniczny, lecz w oprogramowanie komputerowe. Innymi słowy następuje przesunięcie implementacji funkcjonalności z mechaniki do oprogramowania, przy czym najbardziej ważne komponenty systemu pozostają ciągle mechaniczne. Mówimy tu o paradygmacie oprogramowania, a nie o paradygmacie mikroelektroniki czy paradygmacie mikroprocesora, ponieważ to właśnie oprogramowanie dostarcza nowej i szerokiej elastyczności i wolności w projektowaniu i konstruowaniu. W wielu przypadkach właściwe projektowanie oprogramowania jest implementowaniem go w sprzęt elektroniczny, ale w obu przypadkach jest to poziom projektowania oprogramowania.

Stosowanie paradygmatu oprogramowania powoduje, że stare, sprawdzone teorie i pojęcia projektowania mechanicznego zastępuje się młodym, niedojrzałym oprogramowaniem, wbudowanym w młode, niedojrzałe komputery. Ma to ogromne znaczenie w zastosowaniach, gdzie decyduje bezpieczeństwo. Kluczowa cecha oprogramowania, jaką jest jego różnorodność i elastyczność, łatwo prowadzi do problemów złożoności wymagających specjalnej uwagi. Inżynieria mechaniczna, inży-

nieria oprogramowania, inżynieria sterowania i inżynieria komputerowa muszą więc być uprawiane współbieżnie i w sposób zintegrowany.

W opozycji do podejścia komponentowego podejście interaktywne skupia się na interakcjach interdyscyplinarnych. Chodzi o to, aby na tej podstawie identyfikować, formułować i prowadzić nowe badania. Efektem ma być zlikwidowanie luk między dyscyplinami nauk technicznych, z których wiedzy dzisiejsza mechatronika czerpie. Przy takim podejściu widoczne stają się ograniczenia dotyczące tych luk. Podejście interaktywne tworzy więc perspektywę multidyscyplinarną, co pomaga identyfikować nowe kierunki badań w dotychczasowych dyscyplinach. Podejście interaktywne można więc traktować jako doskonalenie dotychczasowych dyscyplin, technik i ich integracji/interakcji. Mechatronika w takim ujęciu jest wymyślaniem i rozwojem nowych teorii, modeli, pojęć i narzędzi w odpowiedzi na potrzeby wyrastające z interakcji dyscyplin naukowych. Odpowiadający temu scenariusz naukowy pokazuje rysunek 1 [WIKANDER, TÖRNGREN 1998].

Przedstawione podejścia nie wykluczają oczywiście innych podejść. Są to jednak najważniejsze podejścia do mechatroniki z punktu widzenia wąsko rozumianej techniki, techniki rozumianej wyłącznie jako system rzeczowy. Brakuje w nich odniesienia do pracy, człowieka i społeczeństwa, czyli ujęcia mechatroniki z punktu widzenia szeroko rozumianej techniki, czyli techniki rozumianej jako system socjotechniczny. Próba takiego ujęcia jest jednym z celów tej książki.



Rys. 1. Integracja dyscyplin daje synergię i nowe kierunki badań

Pojęcie mechatroniki i urządzenia mechatronicznego

Do tej pory używałem pojęcia mechatroniki nie definiując go. Jego historia jest krótka, ale bardzo bogata. W dyskusjach naukowych i technicznych używa się go powszechnie, bez jednoznacznego określenia treści i granic. Słowo „mechatronika” zarówno orientuje jak i tworzy wieloznaczność. Orientuje, bo stanowi pewien formalny konstrukt neologiczny (**mechanika + elektronika**); tworzy wieloznaczność, bo przyciąga specjalistów mechaników, automatyków, elektroników, informatyków. Są oni wprawdzie otwarci na rzeczy nowe, ale często zachowują specjalnościowy sposób myślenia ze skłonnościami do absolutyzowania roli dyscypliny, z której przyszli. W tym też należy upatrywać dużego zróżnicowania definicji mechatroniki.

W istniejących definicjach mechatroniki odmienia się z reguły, na wszelkie możliwe sposoby i w różnorodnych aspektach i kontekstach (strukturalnym, funkcjonalnym), kilkanaście słów kluczowych: integracja, synergia, system, inteligencja (podejmowanie decyzji), mikroelektronika, mikroprocesor, komputer, mechanizm, elektromechanika, sterowanie, czas rzeczywisty. Żadna z nich jednak nie obejmuje mechatroniki całościowo. Pomimo ciągłych prób zdefiniowania mechatroniki, sklasyfikowania urządzeń mechatronicznych czy opracowania curriculum mechatronicznego, umyka nam brak zgody na to jak ma wyglądać jednolity, całościowy opis tego, czym jest mechatronika. Niektórzy twierdzą, że ten brak zgody jest objawem zdrowym [BISHOP, RAMASUBRAMANIAN 2002]. Mówi on bowiem, że dziedzina żyje, że jest przedmiotem młodym. Nawet bez niekwestionowanego definitywnego opisu mechatroniki inżynierowie, na podstawie podanych wcześniej definicji i osobistego doświadczenia, rozumieją ducha mechatroniki. Metaforycznie relacje między mechatroniką a tradycyjnymi dyscyplinami nauk technicznych, z których wyrosła, przypominają relacje w świecie psów: Istnieją jednoznaczne definicje psów rasowych, brak natomiast jednoznacznej definicji psa wielorasowego. Na tle dyscyplin tradycyjnych (psy wielorasowe) mechatronika jawi się jako pies wielorasowy, ze wszystkimi jego zaletami, a jest ich wiele.

W definicjach mechatroniki odniesieniem (celem) jest przede wszystkim przyszły produkt (system), rzadziej proces. Czasem jest to projektowanie czy inżynieria. Niewidocznym odniesieniem jest cała, szerzej rozumiana technika. Sprowadza to mechatronikę wyłącznie do przedmiotowego świata maszyn i urządzeń, gdzie na pierwszym planie nie stoi działanie człowieka za pomocą celowych środków, lecz sztucznie zrobiony wytwór – artefakt mechatroniczny. Takie wąskie pojęcie mechatroniki wyraźnie wyklucza działanie z jej obszaru. A przecież wpływ mechatroniki na działania człowieka staje się coraz większy, a nawet wszechobecny. Mechatroniczne rzeczy nie są własnym światem, oddzielnym od człowieka. Temu nieporozumieniu wydaje się jednak ulegać wielu inżynierów.

Proponuję więc, aby technika mechatroniczna obejmowała zarówno sztucznie wytworzone przedmioty mechatroniczne (artefakty) jak i działanie człowieka dotyczące tych przedmiotów. Innymi słowy – wytwarzanie artefaktów mechatronicznych i ich użytkowanie. Pomaga to bowiem zrozumieć mechatronikę nie tylko jako fenomen techniczny, ale również jako fenomen socjotechniczny. Dlatego warto się

pokusień o ogólną definicję techniki mechatronicznej i pojęć z nią związanych a przede wszystkim tak ważnego dla nas pojęcia urządzenia mechatronicznego.

Technika mechatroniczna, inżynieria mechatroniczna, technologia mechatroniczna

Sama nazwa „mechatronika” na charakter strukturalny⁴; wskazuje bowiem na urządzenia (rzeczy) zbudowane z elementów mechanicznych i elektronicznych. Ale zredukowanie techniki mechatronicznej do zbioru zorientowanych użytkowo artefaktów (systemów rzeczowych) mechaniczno-elektronicznych wydaje się być błędne. Dotychczasowy rozwój urządzeń mechatronicznych pokazuje, że ten zbiór systemów rzeczowych o strukturze mechaniczno-elektronicznej coraz szerzej przejmuje różne zbiory ludzkich działań i urządzeń, w których systemy rzeczowe powstają (np. robot montuje robot) oraz zbiory ludzkich działań, w których systemy rzeczowe są użytkowane (np. robot do montażu, malowania czy spawania).

Technika mechatroniczna jednoczy więc rzeczowe i działaniowe rozumienie techniki. Coraz więcej działań człowieka przenosi na rzeczy (maszyny, urządzenia); pozwala realizować artefakty zastępujące ludzkie działanie. W ten sposób mechatronika staje się synonimem techniki, a technika mechatroniczna synonimem nowoczesnej techniki zastępującej działania człowieka urządzeniami mechatronicznymi.

W ciągu ostatnich trzydziestu lat pojęcie mechatroniki ewoluowało jako zintegrowane i integrujące podejście do projektowania złożonych produktów i systemów, w których skomplikowane i drogie mechaniczne przetwarzanie materiału, energii i informacji zastępuje się prostym i tańszym mechanicznym przetwarzaniem materiału i energii, powiązaniem z bardzo tanim i bardzo wydajnym elektronicznym przetwarzaniem informacji. Krótko mówiąc: układ złożony z samych mechanizmów zastępuje się układem złożonym z prostych mechanizmów, rozbudowanej elektroniki i wielofunkcyjnego oprogramowania. Przykład: kombinacja mało precyzyjnie wykonanej pompy z sensorem przepływu i elektroniczną regulacją daje bardziej stały wydatek cieczy niż pompa wykonana z największą precyzją, ale bez tego układu regulacji. Czasami nawet ta pierwsza jest tańsza od tej drugiej.

Technika mechatroniczna jest więc techniką interdyscyplinarną i transdyscyplinarną, która zajmuje się analizą, syntezą i realizacją zintegrowanych urządzeń mechaniczno-elektronicznych (systemów mechatronicznych), służących do zmieniania stanu materiałów i energii. Jest to technika zorientowana przede wszystkim na metodę, inaczej niż to ma miejsce w technikach klasycznych – mechanicznej, elektrycznej czy elektronicznej – zorientowanych przede wszystkim na produkt.

Pojęcie inżynierii kojarzy się zwykle z rozwojem produktu lub, ostatnio coraz częściej, z rozwojem usług⁵. Przy zaproponowanym szerokim rozumieniu techniki mechatronicznej *inżynieria mechatroniczna* staje się częścią techniki mechatronicznej obejmującą działania projektowe mające do czynienia z urządzeniami

⁴ Funkcjonalnym odpowiednikiem mechatroniki wydaje się być adaptronika. Wpływ elektroniki na dzisiejszą technikę jest tak duży, że powstają kolejne „-troniki”. jak struktronika [GURAN i inni 1998]

⁵ mam tu na myśli takie nazwy jak „inżynieria finansowa” czy „inżynieria sprzedaży”

mechatronicznymi. Jej podstawową cechą jest współbieżność (concurrent engineering), to znaczy równoległe rozwiązywanie wielu aspektów tego samego problemu przez mechaników, elektroników, automatyków i programistów.

W tym miejscu chciałbym się podzielić pewną uwagą o charakterze językowym. Zamiast słowa „technika” coraz częściej używa się dziś słowa „technologia”. W polskim i niemieckim języku politycznym i dziennikarskim – oczywiście pod wpływem angloamerykańskiego słowa „technology” – często jest mowa o „technologii”, gdy właściwie myśli się o „technice”. Próby podkreślenia przez „technologię” naukowego czy społecznego charakteru nowoczesnej techniki nie trafiają w sedno pojęcia. Z powodów logiczno-językowych i naukowo-historycznych wydaje się celowe nawiązać do podstaw terminologicznych z osiemnastego wieku [ROPOHL 1999]: „Technologia jest nauką, która naucza przeróbki naturalistów lub znajomości rzemiosł” [BECKMANN 1777]. *Technologia* jest więc nauką o technice. Podczas gdy *technika* oznacza określony wyżej obszar konkretnej rzeczywistości doświadczalnej, przez technologię rozumie się zbiór naukowo usystematyzowanych wyrażań o owym obszarze rzeczywistości. Z punktu widzenia filozofii języka „technika” jest wyrażeniem języka obiektowego, natomiast „technologia” wyrażeniem metajęzykowym. Klasyczne dyscypliny techniczne, takie jakie uprawia się w szkołach wyższych, można więc nazwać *technologiami szczegółowymi*. Natomiast *technologia ogólna* jest generalistyczno-interdyscyplinarnym badaniem i nauczaniem techniki; jest nauką o ogólnych zasadach funkcji i struktury technicznych systemów rzeczowych i socjokulturowych uwarunkowaniach ich powstawania i użytkowania.

Urządzenie mechatroniczne

Jako ogólną nazwę dla artefaktu mechatronicznego wybrałem słowo „urządzenie”. Wydaje mi się ona szersza i trafniejsza niż „maszyna”, „przyrząd”, „aparat”, „budowla” czy „instalacja”. Urządzenie zwykle definiuje się jako „rodzaj mechanizmu lub zespół elementów, przyrządów służący do wykonywania określonych czynności, ułatwiający pracę”.⁶ Ponadto mamy urządzenia socjalne, kulturalne, finansowe, handlowe (szkoły, szpitale, biblioteki, muzea, banki, sklepy). Wszystkie z nich podlegają dziś szeroko rozumianej mechatronizacji. Jej zakres może być różny. Wyjaśnią to trzy definicje urządzenia mechatronicznego: wąska, średnia i szeroka.

Definicja wąska (komponentowa, uzupełniająca). Urządzenie mechatroniczne jest mechaniczno-elektronicznym urządzeniem nastawczym, które automatycznie wymusza pożądane stany dowolnego klasycznego obiektu rzeczowego. Według takiej definicji urządzenie mechatroniczne jest komponentem (podsystemem) dodanym do klasycznej maszyny, budowli czy instalacji.

Definicja średnia (integrująca). Urządzenie mechatroniczne jest obiektem rzeczowym o zintegrowanej strukturze mechaniczno-elektronicznej. Według takiej definicji cała maszyna, budowla czy instalacja jest urządzeniem mechatronicznym.

⁶ Słownik języka polskiego, PWN Warszawa, 1988

Definicja szeroka (socjotechniczna). Urządzenie mechatroniczne jest systemem rzeczowym o zintegrowanej strukturze mechaniczno-elektronicznej, która w coraz szerszym zakresie przejmując funkcje pracy człowieka. Według takiej definicji urządzeniem mechatronicznym jest powiązanie maszyny, budowli czy instalacji z funkcjami pracy człowieka.

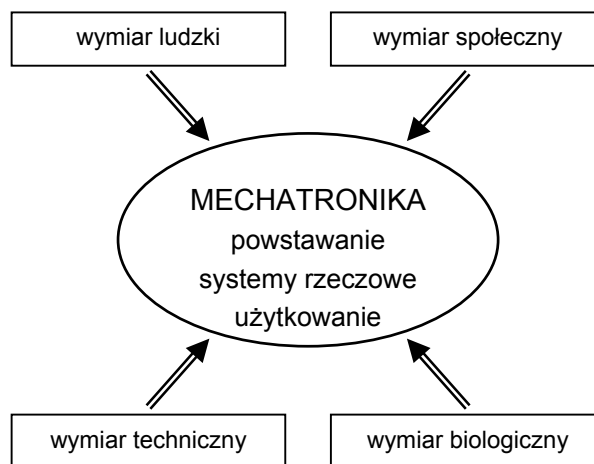
Definicje te ukazują urządzenie mechatroniczne w zależności od stopnia integracji z urządzeniami dotychczasowymi (klasycznymi) i od stopnia uprzedmiotowienia pracy człowieka. Wszystkie zawierają sformułowanie „struktura mechaniczno-elektroniczna”, które można sprecyzować jako programowalny system mechaniczny z sensorami (czujnikami), mikroprocesorami, aktorami (urządzeniami wykonawczymi) i komunikacją. Takie określenie urządzenia mechatronicznego wydaje się być całkowicie niezależne od jego zastosowania. Może to być maszyna, pojazd, budowla, dom, budowla, instalacja itp.

Wymiary i perspektywy poznawcze mechatroniki

Z przedstawionego podejścia do mechatroniki i szerokiego ujęcia urządzenia mechatronicznego otwierają się cztery podstawowe wymiary mechatroniki. Każdy z nich można rozpatrywać w różnej perspektywie poznawczej. Te wymiary i perspektywy można rozpoznać na rysunku 2. W centrum tego rysunku zamiast mechatroniki można wstawić również pracę i przez to uzyskać systematykę zagadnień nauki o pracy. To formalne podobieństwo wskazuje na bardzo ściśle powiązanie pojęcia mechatroniki z pojęciem pracy człowieka.

Perspektywa techniczna

Techniczna perspektywa poznawcza mechatroniki to perspektywa nowej dyscypliny nauk technicznych jako *integracji* dyscyplin dotychczasowych. Chodzi o opracowywanie teorii, które służyłyby przede wszystkim dwóm celom: (1) przepowiedzeniu zachowania planowanego urządzenia mechatronicznego oraz (2) takiemu określeniu budowy urządzenia mechatronicznego, aby dla pożądanego zachowania niezawodnie spełniało pożądane funkcje. Tym celom służy również analiza empiryczna i teoretyczna już wykonanych urządzeń mechatronicznych. Relacja między teoriami klasycznych nauk technicznych a teoriami mechatronicznymi wydaje się przypominać relację, jaka zachodzi między tymi pierwszymi a teoriami nauk przyrodniczych. Tak jak nauki techniczne nie są po prostu czystym zastosowaniem nauk przyrodniczych, tak samo mechatronika nie wydaje się czystym zastosowaniem tradycyjnych nauk technicznych.



Rys. 2. Wymiary i perspektywy poznawcze mechatroniki

Specyficzny dla mechatroniki problem polega na tym, żeby różnorodne prawidłowości nauk technicznych (budowy maszyn, automatyki, elektroniki, informatyki) wzajemnie połączyć teoretycznie, bo w urządzeniu mechatronicznym współdziałają one przecież realnie. Działanie hamulca mechatronicznego (ABS) opiera się nie tylko na zasadach mechaniki i klasycznej budowy maszyn, ale wykorzystuje również wiedzę z elektroniki i techniki komputerowej. Dopiero wzajemne powiązanie tej wiedzy umożliwia skuteczne zrealizowanie hamulca. Z drugiej strony ta sama zasada tradycyjnych nauk technicznych może być wykorzystana w różnorodnych rozwiązaniach mechatronicznych, które następnie w analizie porównawczej trzeba przebadać i ocenić z punktu widzenia ich możliwości zastosowania. W tym wszystkim zacierają się granice między nauką ścisłą a praktyczną nauką o sztuce mechatronicznej. Doświadczalne reguły techniki mechatronicznej problematyzuje się teoretycznie zwykle wtedy, gdy nie sprawdzają się w praktyce technicznej. Wiedza mechatroniczna nie jest więc prostym zastosowaniem mechaniki, automatyki, elektroniki i informatyki. Wiedza ta powstaje raczej ze zorientowanej na zastosowanie integracji i transformacji elementów wiedzy dotychczasowych nauk technicznych w połączeniu z regułami praktycznymi, wyprowadzonymi z doświadczenia.

Perspektywa biologiczna

Istniejące dziś organizmy żywe są wynikiem długotrwałego doboru naturalnego. Dlatego można je traktować jako wysoko zorganizowane, doskonałe maszyny. Mogą one stanowić wzór do naśladowania w urządzeniach mechatronicznych, z czego już czyni się użytek – szczególnie, gdy zauważymy, że w organizmach żywych dominują takie cechy jak: prostota (minimalna liczba makroczęści, minimalna liczba połączeń ślizgowych, połączenia ciągłe), elastyczność (struktury elastyczne, struktury rozproszone i zdecentralizowane, sterowanie adaptacyjne), samouzdrawianie, sensoryka w dużej skali, uczenie się i instynkt. Można przyjąć, że w przyszłości urządzenia mechatroniczne będą nieuchronnie stawać się coraz

bardziej złożone i rozwijać się drogą rozproszenia. Już dziś mechatronika stosuje modele neurobiologiczne do sterowania ruchem potrzebnym do chwytania czy chodzenia robotów.

Między mechatroniką a biologicznym przetwarzaniem informacji rozwija się bardzo stymulująca kooperacja. Po jednej stronie przetwarzanie danych i informacji i sensoryka w systemach biologicznych mogą służyć jako model dla nowoczesnych systemów mechatronicznych, po drugiej – systematyczna i sprawdzona technika budowania modeli w mechatronice może pomóc precyzować dotychczas raczej opisowe modele wejścia/wyjścia w biologii.

Perspektywa ludzka (antropologiczna)

Urządzenia mechatroniczne są budowane przez ludzi i to ludzie używają ich do swych celów. Technika mechatroniczna nie jest światem danym, lecz światem zrobionym. Wszystko zrobione ma swego twórcę, który to zrobił i swego adresata, dla którego jest to robione. Dlatego rozumienie techniki mechatronicznej nie powinno ograniczać się tylko do wymiaru czysto technicznego, jak to ma miejsce w naukach technicznych.

Podstawowe współzależności między sposobem egzystencji człowieka i tym sztucznym światem, którym się otoczył i który staje się coraz bardziej mechatroniczny, można określić w antropologicznej perspektywie poznawczej. Technika objawia się wtedy jako wynik i jako środek pracy. Człowiek nie jest dziś już tylko istotą żywą, wytwarzającą narzędzia, jak to uważano jeszcze do niedawna; jest on istotą pracującą na zmechatronizowanych stanowiskach, podróżującą zmechatronizowanymi samochodami, fotografującą mechatronicznymi aparatami, używającą mechatronicznych twardego dysków do gromadzenia informacji i coraz nowszych „bajerów mechatronicznych”. Krótko mówiąc: w pracy własnej i w czasie wolnym człowiek bezwiednie stosuje technikę mechatroniczną, często nie zdając sobie z tego sprawy, że ma do czynienia z mechatroniką.

Perspektywy antropologicznej nie można ograniczać do filozofii wyjątkowej roli człowieka w przyrodzie (*homo faber*). Ważne jest szczególne podkreślenie dalszych perspektyw, które mogą być przejęte z empirycznych nauk o człowieku. Perspektywa *fizjologiczna* ujmuje współdziałanie między wytworem techniki mechatronicznej a fizycznym oddziaływaniem organizmu człowieka. Przy rosnącej mechatronizacji produkcji wynikają stąd również problemy użytkowania urządzeń mechatronicznych. Mechatronizacja oznacza dopasowywanie urządzeń do człowieka. W krańcowych przypadkach powoduje to prawie fizjotechniczną, a nawet egzystencjalną symbiozę człowieka z mechatroniką (nowoczesne protezy kończyn, sztuczne płuca, nerki czy serca).

Na koniec muszę wspomnieć o perspektywie *etycznej*. Technika mechatroniczna rozszerzyła możliwości działania jak żadna z technik klasycznych. Wystarczy popatrzeć na rozwój techniki robotycznej i związany z tym spadek zapotrzebowania na pracę powtarzalną, rutynową, którego skutkiem może być bezrobocie. Ponieważ wytwarzanie i użytkowanie urządzeń mechatronicznych zawsze obejmuje działania człowieka, nie można pozostawić bez odpowiedzi pytania: jakie działania

mechatronizacyjne są moralnie poprawne a jakie nieuprawnione. Perspektywa etyczna jest niezbędna w zrozumieniu i kształtowaniu techniki mechatronicznej.

Perspektywa społeczna

Społeczny wymiar techniki mechatronicznej ukazuje się najpierw w perspektywie *ekonomicznej*. Podstawowe obszary mechatroniki są ściśle powiązane z potrzebami rynku, wytwarzaniem, zarządzaniem i marketingiem. Dotyczy to szczególnie mechatronicznych produktów konsumpcyjnych, takich jak kamery wideo czy odtwarzacze płyt kompaktowych. 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 nadażenia za rosnącą potrzebą oraz (3) nacisk na produkty konkurencyjne. Czynniki te powodują, że cykl rozwoju produktu mechatronicznego w Japonii jest krótszy niż w Europie. Przy tym, co ciekawe, stopień innowacji, przypadający na cykl rozwoju, jest często mniejszy. O ile w perspektywie technicznej można mówić o samodzielności techniki mechatronicznej, o tyle w perspektywie ekonomicznej, jak widać, wiele przemawia za tym, że technika mechatroniczna pozostaje raczej na służbie gospodarki.

Rozwój techniki mechatronicznej zmienia środowisko pracy człowieka. W ten sposób wkraczamy w obszar *socjologicznej* perspektywy poznawczej. W następstwie podziału pracy wykształcają się najróżniejsze kwalifikacje i kompetencje, które właśnie definiuje się przez umiejętność obchodzenia się z określonymi urządzeniami mechatronicznymi. Zmienia się rynek pracy, co z kolei wpływa na system kształcenia.

Potrzeby, dla których zaspokajania wytwarza się produkty mechatroniczne, w dużej części nie są uwarunkowane antropologicznie. Są one raczej konstruktami społecznym określanymi przez normy i standardy socjokulturowe. Ponadto nowe potrzeby są ciągle pobudzane przez innowacje mechatroniczne, które można wyjaśnić po części interesami ekonomicznymi, po części również jednak przez ukryte potrzeby społeczne. Jeżeli innowacja mechatroniczna zostanie zaakceptowana, to jej skutki społeczne leżą na dłoni. Każdy zna głębokie zmiany zachowania, jakie nastąpiły wraz z masowym zastosowaniem komputerów czy telefonów komórkowych. Wniosek: Technika mechatroniczna i przemiany społeczne oddziałują na siebie, i to bardzo różnorodnie.

Nowoczesna technika jest techniką mechatroniczną. W ramach socjologii pracy nie można dziś poprawnie analizować społecznego charakteru pracy bez uwzględnienia środków pracy jako manifestacji nowoczesnej techniki mechatronicznej. Do tego należałoby zaliczyć wpływ mechatronizacji na zatrudnienie, kwalifikacje i społeczną sytuację pracowników.

Wiedza z zakresu socjologii pracy odgrywa coraz większą rolę w nauce o pracy, szczególnie od momentu, kiedy ta ostatnia wyraźnie zwraca się ku humanizacji pracy. Również te kierunki nauki o pracy, które przede wszystkim dążą do maksymalizacji wydajności pracy człowieka, wskazują na ogromne znaczenie związku człowiek-maszyna. Mechatronika zmienia ten związek czasami radykalnie. Dlatego

konieczna jest interdyscyplinarna nauka o pracy, która zajmie się socjotechniczną optymalizacją nowych systemów pracy. Chodzi przy tym o systemy, które dopasują techniczne (mechatroniczne) środki pracy i formy organizacji raczej do fizycznych i psychospołecznych potrzeb ludzi, zamiast podporządkowywania ludzi do pozornych przymusów techniczno-organizacyjnych.

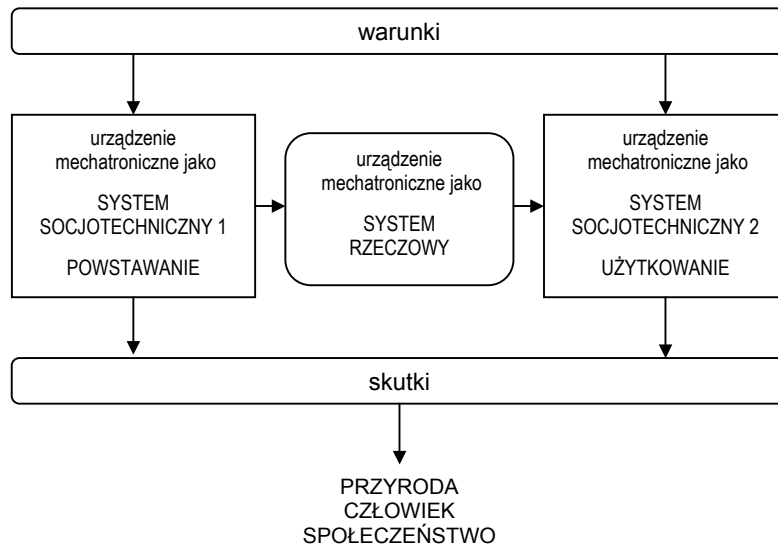
Wiąże się z tym ściśle perspektywa *edukacyjna*. Edukacja mechatroniczna stanowi szansę i wyzwanie dla szkolnictwa zawodowego na poziomie wyższym i średnim. Szansę, ponieważ jej treści i metody pokazują jak przez integrację wiedzy racjonalnie rozwiązać dydaktyczny problem „materiał-czas”; wyzwanie, bowiem trzeba dużo trudu, aby przestawić się z tradycyjnego myślenia branżowo-przedmiotowo-produktowego na myślenie czynnościowo-obiektowo-procesowe.

Synteza interdyscyplinarna

Technika mechatroniczna obejmuje urządzenia mechatroniczne jako systemy rzeczowe oraz ich powstawanie i użytkowanie w systemach socjotechnicznych. Spłot stosunków między powstawaniem urządzeń mechatronicznych, samymi urządzeniami i ich użytkowaniem ma wymiar techniczny, biologiczny, ludzki i społeczny. Technika mechatroniczna powstaje między przyrodą, poszczególnymi ludźmi i społeczeństwem. Wymiary te z jednej strony wpływają na warunki, którym technika mechatroniczna podlega, z drugiej zaś są wystawione na jej skutki (rysunek 3). *Każde urządzenie mechatroniczne jest interwencją w przyrodę, człowieka i społeczeństwo.*

Według typowego ujęcia dyscyplina naukowa konstituuje się przez swój obiekt doświadczeń, pewien określony obszar zjawisk, któremu poświęca uwagę. Przyjmuje się, że rzeczywistość można podzielić na jednoznaczne obszary i że każdorazowe aspekty można traktować w izolacji, niezależnie od innych. W badaniach naukowych taka dyscyplinowa specjalizacja wydaje się niezbędną, jako, że z powodu ekonomii pracy i ekonomii myślenia prowadzi do owocnej koncentracji wiedzy. Staje się jednak wątpliwa, gdy umacnia się w absolutyzowaniu własnej ważności. A to dlatego, że pomija wtedy problemy leżące w poprzek panujących podziałów.

Z punktu widzenia obszaru zjawisk mechatronika nie daje się jednoznacznie przyporządkować ani klasycznej budowie maszyn, ani automatyce, ani elektronice, ani informatyce. Nie daje się też zredukować do jednego z czterech wspomnianych aspektów. Żadna z tych pojedynczych perspektyw nie wystarcza, aby technikę mechatroniczną zrozumieć jako całość. Jest ona złożonym zestawem zagadnień, który w podziale fachowym uznanych dyscyplin po prostu nie jest do końca zrozumiałą. Jeżeli, mimo tych trudności, pozostają przy zamierzeniu ujęcia techniki mechatronicznej w jednym globalnym modelu, który uwzględni wszystkie jej właściwości, to muszą różne wymiary i perspektywy sprowadzić do interdyscyplinarnej syntezy. Chcę przy tym raczej wyjść z *konkretnej złożoności mechatroniki*, takiej jak wystąpiła w tym wprowadzeniu. Dla wymiarów i perspektyw chcę wykorzystać teoretyczne i empiryczne zasoby wiedzy, które istnieją już w poszczególnych dyscyplinach lub które należy opracować.



Rys. 3. Schemat problemów techniki mechatronicznej

Zadanie polega więc na problemowo zorientowanej integracji wiedzy z różnych dyscyplin; integracji, która doprowadzi do interdyscyplinarnego opisu urządzenia mechatronicznego. Technika mechatroniczna nie jest bowiem tylko wiedzą przetworzoną z wiedzy nauk przyrodniczych, wiedzy klasycznych nauk technicznych i doświadczenia, lecz również społecznym produktem pracy i przez to częścią praktyki społecznej.

Obfitość istniejącej i szybko powstającej nowej wiedzy będzie sprawiać mi ogromne trudności w zakresie ekonomii pracy i ekonomii myślenia. Wiem, że jako pojedyncza osoba książką tą nie osiągnę tej pełni, jaką zapewniłby dłuższy zespołowy proces badawczy. Ale dla interdyscyplinarnej syntezy nie wystarczy zgromadzić w jednym miejscu heterogeniczne koncepcje i różnorodne podejścia metodyczne obok siebie bez wzajemnego powiązania. Na pierwszym planie powinien stać raczej potencjał integracyjny, dysponujący zdolnością uogólniania pojęć i koncepcji. Takim potencjałem dla interdyscyplinarnej syntezy mechatroniki są modele teoretyczne oferowane przez teorię systemów a szczególnie przez systemową teorię techniki [ROPOHL 1979, 1999].

Układ książki

W tym wstępnym, *pierwszym rozdziale* nakreśliłem zadanie książki na trzy sposoby. Najpierw przedstawiłem problemy z jakimi boryka się dziś mechatronika. Następnie krótko podsumowałem istniejące podejścia do mechatroniki. Na koniec naszkicowałem systematykę perspektyw poznawczych mechatroniki, która opiera się na tradycyjnym podziale nauk. Z tego wyciągnąłem wniosek, że racjonalne

podejście do mechatroniki i urządzeń mechatronicznych wymaga syntezy interdyscyplinarnej, którą należy przedstawić w logicznym, przekonującym szkielecie.

Takim szkieletem może być systemowa teoria techniki, opracowana przez G. ROPOHLA. Dlatego w kolejnych dwóch rozdziałach chcę czytelnika w nią wprowadzić. Najpierw w *rozdziale drugim* wprowadzę czytelnika w styl myślenia systemowej teorii techniki. Uczynię to w sposób niejawni na przykładzie urządzenia, które pod nazwą ABS stało się już powszechnie znanym urządzeniem mechatronicznym. Będzie to również przystępne wprowadzenie w istotę urządzenia mechatronicznego. Bliżej i bardziej formalnie systemową teorię techniki przedstawię w *rozdziale trzecim*. Teoria ta będzie prowadzić kolejne rozważania, w których postaram się rozwinąć systemowe modele mechatroniki i urządzenia mechatronicznego. Te abstrakcyjne modele będą konkretyzowane również na przykładzie ABS-u, a właściwie na przykładzie hamulca mechatronicznego.

W *rozdziale czwartym* systemowa teoria techniki zostanie zaadaptowana do mechatroniki i urządzeń mechatronicznych. W rozważaniach tych pokażę, że systemowy model mechatroniki obejmuje nie tylko same urządzenia mechatroniczne (mechatroniczne systemy rzeczowe), ale również działania indywidualne i społeczne, w które te urządzenia dają się włączyć, oraz związane z nimi współzależności socjotechniczne. Z powiązania ludzkiego systemu działaniowego i mechatronicznego systemu rzeczowego powstanie mechatroniczny system socjotechniczny. Takie ujęcie systemowe umożliwi pokazanie najważniejszych zależności wewnętrznych w zagmatwanej różnorodności poszczególnych zjawisk mechatronicznych oraz uzasadni ogólną klasyfikację wytworów nowoczesnej techniki.

W *rozdziale piątym* spróbuję przeanalizować współzależności powstawania urządzeń mechatronicznych. Podejdę do tego z dwóch stron – ontogenetycznej i filogenetycznej.

Rozdział szósty poświęcony zostanie współzależnościom (uwarunkowaniom) użytkowania urządzeń mechatronicznych, ponieważ tylko w ludzkim działaniu użytkowym spełniają one swoje przeznaczenie. Przez to zwrócę się ku tematowi, który w filozofii techniki i badaniach naukowych techniki znalazł małe zainteresowanie w porównaniu z współzależnością powstawania. Opiszę mianowicie jak mechatronika uprzedmiotawia pracę człowieka.

W końcowym, *siódmym rozdziale*, spróbuję podsumować systemowy model mechatroniki, opracowany przeze mnie w tej książce. Spróbuję też samokrytycznie odpowiedzieć na pytanie czy udało mi się tylko systematyczne opisanie urządzenia mechatronicznego, czy też może powstało oprócz tego coś więcej, na przykład nowe zagadnienia problemowe, które bez analizy teorisystemowej być może w ogóle by się nie pojawiły.

2. Przykład wprowadzający

Model, za którego pomocą chcę opisać urządzenie mechatroniczne, składa się ze szkieletu myślowego i wyrażeniowego, który nie jest powszechnie znany. Jest nim systemowa teoria techniki, opracowana przez niemieckiego inżyniera i filozofa GÜNTHERA ROPOHLA [1979, 1999]. Aby ułatwić podejście do tego szkieletu, posłużę się przykładem wprowadzającym, na którym dowolnie użyję nowych środków opisu, bez uzasadniania ich w szczegółach⁷.

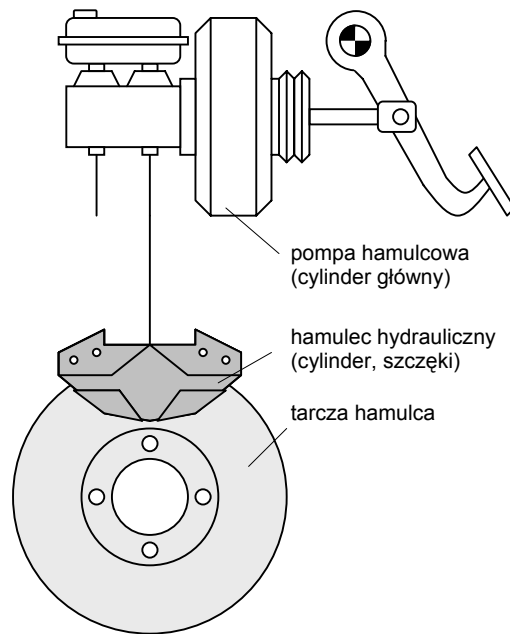
Jako przykład wybrałem urządzenie szeroko dziś używane w samochodach do poprawy bezpieczeństwa jazdy, znane powszechnie pod skrótem ABS (niem. Anti-blockierungs-System). Urządzenie to, jak wskazuje sama nazwa, przeciwdziała zablokowaniu się hamulców (kół) pojazdu na śliskiej nawierzchni. W swej dotychczasowej postaci ABS pojawił się po raz pierwszy w 1967 roku; od 1978 roku jest produkowany seryjnie, a od 1991 roku jest znormalizowany. ABS stanowił punkt wyjścia do wprowadzenia kolejnych, coraz bardziej rozbudowanych urządzeń mechatronicznych w samochodach, jak ASR (Anti-Schlupf-Regelung), ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) i VDC (Vehicle Dynamics Control) [MAIER, MÜLLER 1995, van ZANTEN 1995, BOSCH 2000].

Ponieważ ABS używany jest już powszechnie, każdy kierowca ma o nim pewne wyobrażenie. Jest to przede wszystkim wyobrażenie funkcjonalne, czyli w sensie „co ABS robi?” albo „co ABS daje?”. Kierowcy wiedzą najczęściej, że chodzi o pulsowanie ciśnienia w układzie hamulcowym, kiedy koło zostaje zablokowane. Nie wielu wie o strukturze urządzenia, ponieważ jest ona ukryta w podwoziu samochodu i pod maską silnika. Mam tu na myśli elementy (części, komponenty) jak czujniki obrotu kół, zawory elektromagnetyczne, pompę hydrauliczną, silnik elektryczny, elektronika (sterownik mikroprocesorowy) czy przewody elektryczne i hydrauliczne. Niektóre z tych elementów są zintegrowane w jednej obudowie (zawory, pompa, silnik, elektronika) i przez to niedostępne gołym okiem. Dlatego spróbujemy przedstawić istotę działania układu hamulca z ABS na tle hamulca klasycznego.

Opis techniczny

W klasycznym tarczowym hamulcu hydraulicznym siła zaciskająca szczęki (klocki) na powierzchni tarczy hamulcowej powstaje zwykle przez działanie ciśnienia cieczy na tłoczek związany z jedną ze szczęk, umieszczony w obudowie hamulca (rys. 4). Ciśnienie to powstaje przez przesuwanie tłoczka pompy hamulcowej podczas naciskania na pedał hamulca.

⁷ W następnym rozdziale przedstawię bliżej systemową teorię techniki



Rys. 4. Klasyczny układ hamulcowy z tarczowym hamulcem hydraulicznym

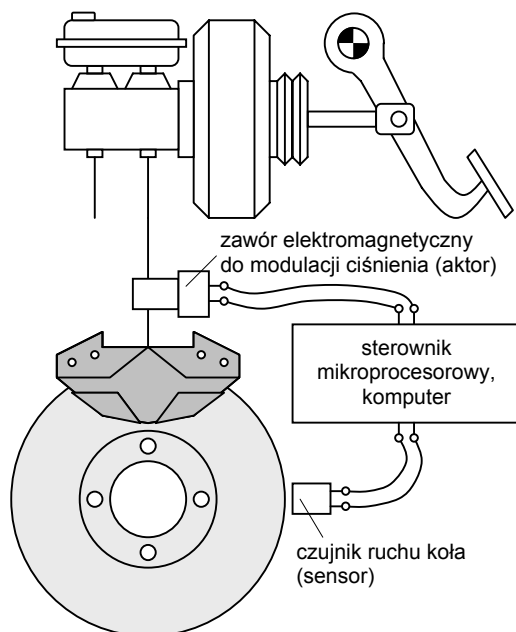
Hamulec taki, podczas hamowania na podłożu o małej przyczepności (śliskim, piaszczystym), szybko zatrzymuje (blokuje) koło. Mała przyczepność powoduje zmniejszenie momentu hamowania a więc szybkie zatrzymanie koła. Przystaje się ono obracać wokół własnej osi a mała przyczepność z kolei powoduje, że samochód „przestaje słuchać kierownicy” i staje się niesterowalny; siła bezwładności niesie go w dotychczasowym kierunku jazdy, a nie w kierunku zgodnym z zamiarami kierowcy, wynikającym ze skręcenia kierownicą.

Rozwiązaniem tego problemu jest przeciwdziałanie blokowaniu. Można to uzyskać przez szybką (kilkadziesiąt razy na sekundę) pulsację ciśnienia hamowania od chwili, gdy koło przestało się obracać. Tak szybkiej pulsacji człowiek nie jest jednak w stanie wytworzyć swoją nogą a ponadto nie jest w stanie bezpośrednio wyczuć chwili zablokowania koła. Siły i ruchy człowieka oraz reakcje jego zmysłów są zbyt powolne w stosunku do dynamiki zjawiska, nad którym musi zapanować. Dlatego musi go w tym wyręczyć urządzenie techniczne, na przykład takie jak na rysunku 5.

Wyręczenie to powstaje przez rozszerzenie hamulca z rysunku 4 o trzy funkcje:

- Funkcję wyczuwania chwili zablokowania koła. Realizatorem (nośnikiem) tej funkcji jest czujnik (sensor) ruchu tarczy hamulcowej.

- Funkcję szybkiego pulsowania ciśnienia płynu hamulcowego. Nośnikiem tej funkcji jest urządzenie wykonawcze (aktor) w postaci szybko wyłączanego i włączanego zaworu elektromagnetycznego.
- Funkcję odbierania i oceniania sygnałów z czujnika oraz szybkiego naprzemiennego włączania i wyłączania (sterowania) zaworu elektromagnetycznego. Nośnikiem tej funkcji jest sterownik w postaci mikroprocesora, mikrokontrolera lub mikrokomputera.



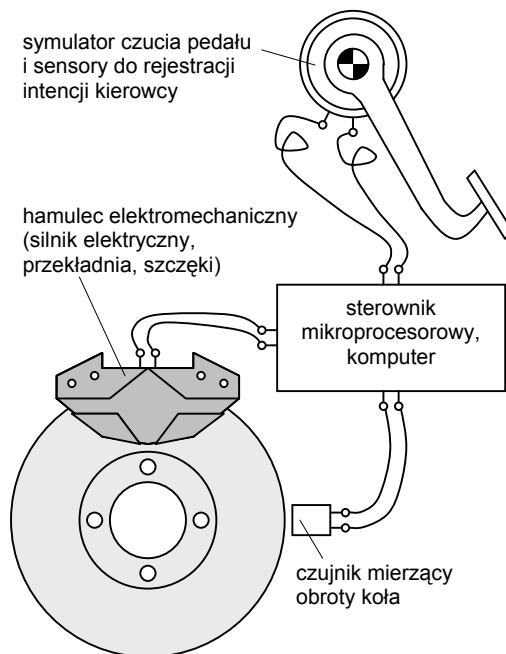
Rys. 5. Hydrauliczny hamulec tarczowy z układem zapobiegającym blokowaniu (ABS)

Rozwiązanie takie, znane dziś powszechnie jako ABS, przeciwdziała blokowaniu kół podczas hamowania, przez co, jak już powiedzieliśmy, pojazd nadal reaguje na ruchy kierownicy. Zwiększa ono bezpieczeństwo nie tyle przez skrócenie drogi hamowania, ile przez stworzenie możliwości ominięcia nagłej przeszkody.

Ponieważ apetyt rośnie w miarę jedzenia, zaczęto myśleć nad skróceniem drogi hamowania. Ale co to jest droga hamowania? Można na nią spojrzeć z dwóch punktów widzenia: (1) z punktu widzenia samochodu droga hamowania jest drogą przebytą przez pojazd od chwili zadziałania szczęk hamulca do chwili zatrzymania się pojazdu; (2) z punktu widzenia kierowcy droga hamowania jest drogą przebytą od chwili zauważenia przeszkody do chwili zatrzymania się pojazdu. Ta druga jest znacznie dłuższa, bo do drogi przebytej od chwili zadziałania szczęk hamulca dochodzi droga od chwili naciśnięcia pedału do chwili zadziałania szczęk oraz droga od chwili zauważenia przez kierowcę przeszkody do chwili naciśnięcia przez niego

pedału hamulca. Innymi słowy: ogromny udział w drodze hamowania ma czas (okres) reakcji układu hamulcowego i czas reakcji człowieka, tym bardziej, że w okresach tych pojazd nie zwalnia, lecz jedzie z pierwotną prędkością. I w tym dostrzeżono potencjalne możliwości skrócenia drogi hamowania.

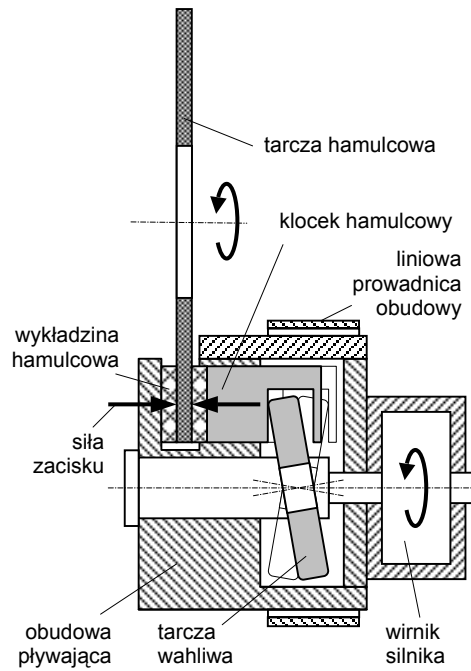
Pierwszą jest skrócenie czasu reakcji układu hamulcowego. Czas ten w przypadku klasycznego, hydraulicznego przekazywania siły z pedału do cylindra szczęk jest stosunkowo duży. Zależy bowiem od długości i podatności przewodów hydraulicznych. Rozwiązaniem jest zastąpienie hydrauliki elektryką. Przekazywanie siły z pedału do szczęk staje się kilka razy szybsze. Wymaga to jednak zmiany konstrukcji układu hamulcowego – z hydraulicznego na elektromechaniczny – jak na rysunku 5.



Rys. 6. Hamulec elektromechaniczny z układem zapobiegającym blokowaniu

W konstrukcji na rysunku 6 pompę hydrauliczną zastępuje symulator czucia pedału i sensory do rejestracji intencji kierowcy. Sygnały z sensorów płyną kablem elektrycznym (by wire) do regulatora w sterowniku, który steruje hamulcem elektromechanicznym, na przykład takim jak na rysunku 7. Zalety są dwie: (1) pedał ze złożonego elementu energetyczno-informacyjnego (źródło energii hamowania + sygnał niosący informację o mocy i przebiegu hamowania) staje się wyłącznie elementem informacyjnym; (2) następuje siłowe odciążenie ruchu nogi kierowcy, co sprzyja przekazaniu informacji o jego intencjach dotyczących przebiegu hamowania (stopniowe, nagłe, paniczne). W oprogramowanie sterownika można wbudować

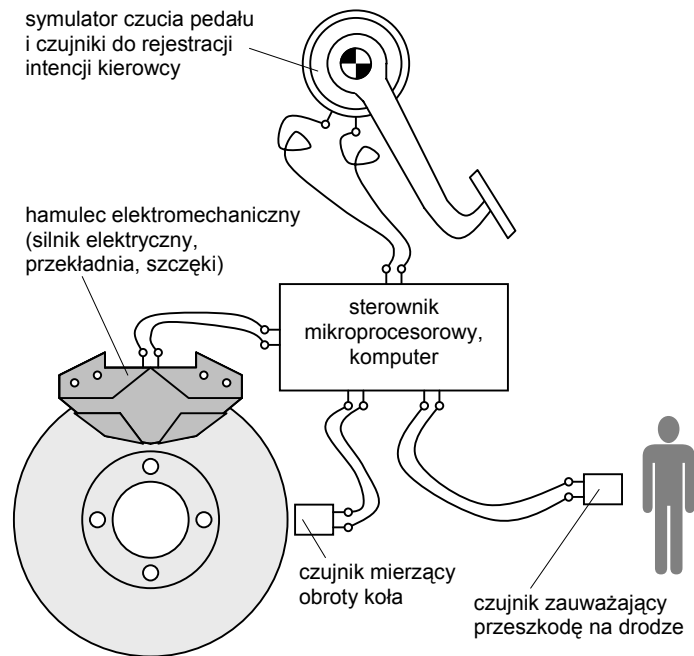
programy realizujące odpowiednie sposoby hamowania (czyli sterowania drogą, prędkością i przyspieszeniem kątowym wału silnika elektrycznego na rysunku 7) w zależności od sposobu naciskania na pedał (powoli, nagle, panicznie). Elektroniczny pedał hamulca, jego wygodne, ergonomiczne usytuowanie i minimalne siły nacisku mogą doprowadzić do zyskania połowy sekundy (0,5 s) podczas zainicjowania hamowania, co skraca drogę hamowania ze 100 km/h o około 20% [BERTRAM 2002].



Rys. 7. Szkic elektromechanicznego hamulca tarczowego z przekładnią precesyjną (tarczą wahlową)

Tak więc, stosując środki mechatroniczne (sensory, mikroprocesory, aktry), można zmniejszyć czas reakcji układu hamulcowego kilka razy. Ale pozostał jeszcze niewykorzystany potencjał jakim jest czas reakcji człowieka, jaki upływa od chwili zauważenia przeszkody do chwili naciśnięcia na pedał hamulca. Czas ten można znacznie skrócić, gdy to nie kierowca lecz sensor będzie decydował o zauważeniu przeszkody. Technika jest tu bowiem nieporównanie szybsza i bardziej niezawodna niż oko ludzkie, a szczególnie, gdy jest zmęczone. Powstanie wtedy urządzenie, jak na rysunku 8, które rzeczywiście zredukują drogę hamowania. Czujnik zauważający przeszkody będzie wspomagał kierowcę w sytuacjach trudnych, wykraczających poza zdolności percepcyjne człowieka.

Myślę, że na przykładzie ABS czytelnik już sobie poglął na to, czym jest urządzenie mechatroniczne. Przede wszystkim widać, że urządzenie to jednoczy w całość trzy obszary specjalistyczne: mechanikę, elektronikę i informatykę. Jeżeli jednak do bliższego wyjaśnienia laikowi (a nawet specjaliście z jednego z tych obszarów) istoty, budowy i działania tego urządzenia chcielibyśmy wykorzystać fachowe pojęcia tych obszarów, to może się to okazać bardzo trudne. Po pierwsze obszary te mają własne „języki”, co sprawia, że różni specjaliści mają kłopoty w komunikowaniu się ze sobą. Po drugie, dokładność języka fachowego wymaga nie tylko znacznego wysiłku uczenia się, ale również dłuższego rozumowania analitycznego, co chciałoby się przecież ująć jako jedną całość. Wyjaśni to moja definicja urządzenia mechatronicznego.



Rys. 8. Hamulec elektromechaniczny z układem zapobiegającym blokowaniu i układem automatycznie hamującym w przypadku zauważenia przeszkody

Urządzenie mechatroniczne jest **mechaniczno-elektronicznym automatem** (mechatromatem) przetwarzającym materiał, energię i informację, które:

- Składa się z mechanicznego aparatu ruchowego, wyposażonego w wielofunkcyjne czujniki (sensory) i elektroniczne sterowalne elementy wykonawcze (aktory) o różnych fizykalnych zasadach działania.
- Z informacji sensorycznej (dane) i informacji wprowadzonej przez człowieka (rozkazy, algorytmy, programy), za pomocą komputerowego (mikroprocesoro-

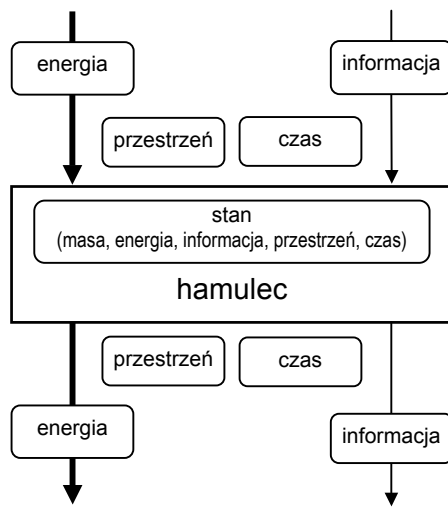
wego) jej przetwarzania, generuje sygnały sterujące napędami aktorów w celu reagowania, w czasie rzeczywistym, na zmiany lub błędy w przebiegu procesu realizowanego przez aparat ruchowy. Szczególne znaczenie ma przy tym koordynacja ruchu i niezbędne do tego sposoby komunikacji przy więcej niż jednym napędzie.

- Dopasowuje charakterystyki mechanicznego aparatu ruchowego do zmiennych warunków i wymagań otoczenia przez kompensowanie niedoskonałości mechanicznych (np. odkształceń czy luzów) oraz podejmuje samoczynną diagnozę z możliwą korekcją.

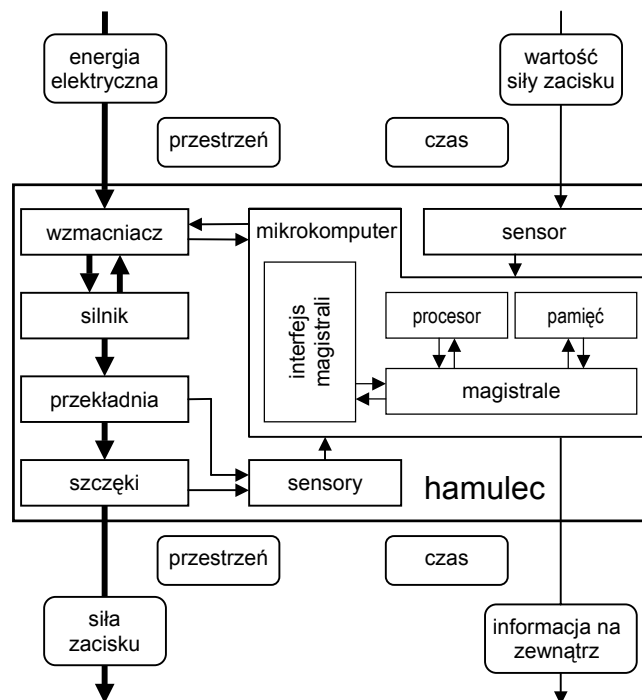
Zdaję sobie sprawę, że powyższą definicję trzeba kilka razy przeczytać, aby ją zrozumieć w połowie. Również wtedy, gdy użyte w niej fachowe słowa zostały częściowo wyjaśnione, potrzeba podręcznika budowy maszyn, automatyki, elektroniki i informatyki, aby wyczerpująco przedstawić, co się za tymi słowami kryje.

Chciałbym więc zaproponować inny sposób przedstawienia. Rysunek mówi więcej niż tysiąc słów. Dlatego chcę przedstawić podstawowe cechy urządzenia mechanicznego w formie graficznej. Rysunek 9 pokazuje hamulec jako skrzynkę, do której coś wchodzi, co ma określone stany, i z czego coś wychodzi. Tak przedstawiony model nazywa się „czarną skrzynką”, ponieważ wewnątrz pozostaje niewidzialne; inną nazwą jest „schemat blokowy”. Takie przedstawienie odpowiada naszemu doświadczeniu codziennemu, kiedy obchodzimy się z hamulcem: naciskamy pedał, a samochód hamuje w przewidywalny sposób. To, co w tym czasie dzieje się w „czarnej skrzynce”, jest dla nas nierozpoznawalne; w każdym jednak przypadku wiemy, że we wnętrzu znajduje się program do przetwarzania ruchu naszej nogi na pożądane działanie hamulca. Program ten troszczy się o to, aby nasze przyciskanie nogą przekształcić w bezpieczne zachowanie się samochodu podczas hamowania.

Schemat blokowy z rysunku 9 daje zgrubne wrażenie o tym, jak się zachowuje hamulec. Schemat ten pokazuje, że hamulec – za pomocą energii oraz w czasie i przestrzeni – przekształca określoną energię (siły, momenty) w inne siły, oraz określone informacje w inne informacje; i że w tym celu znajduje się w odpowiednim stanie wewnętrznym, który również scharakteryzowany jest przez informacje. Stąd powstaje pytanie, jak ten stan jest wytwarzany; innymi słowy, jak wygląda wewnątrz tej „czarnej skrzynki”. Schemat blokowy trzeba więc uczynić przejrzystym, abyśmy mogli rozpoznać jego budowę wewnętrzną. Jak to widać na rysunku 10, struktura hamulca składa się z wielu wzajemnie powiązanych części (patrz rysunki 5 i 6). I tak mamy wejście energetyczne w postaci energii elektrycznej i wejście informacyjne do wprowadzania wartości nominalnej siły zacisku. Lewa strona struktury to elementy „siłowe” (wzmacniacz, silnik, przekładnia, szczęki), prawa zaś to elementy „sygnałowe” (sterownik, sensory), które przetwarzają informację służącą do sterowania tymi pierwszymi.



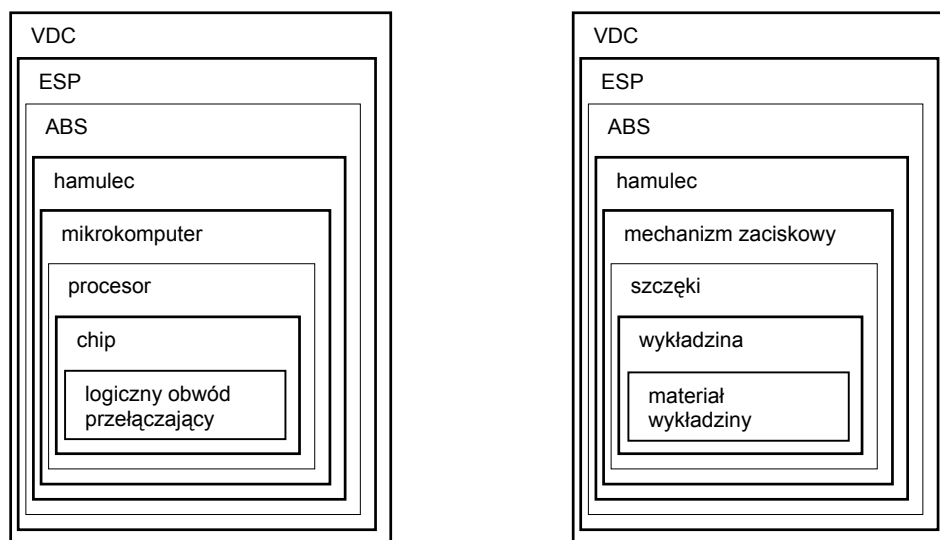
Rys. 9. Schemat blokowy hamulca



Rys. 10. Struktura mechatronicznego hamulca elektromagnetycznego

Wymienione części składowe hamulca znowu ukazują się jako „czarne skrzynki”, ale już na niższym poziomie. Dla mikrokomputera powtórzyliśmy to postępowanie jeszcze raz i na rysunku mamy zaznaczone jego części składowe. W zasadzie można to zrobić dla innych bloków strukturalnych, ale rysunek przestałby być przejrzysty. W przypadku mikrokomputera dokładniejszy podział jest szczególnie ważny. Można bowiem przez to pokazać, jak funkcjonuje przetwarzanie informacji w hamulcu.

Przez hamulec, jego główne części składowe i komponenty mikrokomputera centralnej przedstawiliśmy trzy różne poziomy naszych rozważań dotyczących opisu hamulca mechatronicznego. Na pierwszym poziomie naszkicowaliśmy cały zgrubny opis hamulca, na kolejnych poziomach zaś zobaczyliśmy coraz więcej detali. Taką metodę opisu można zastosować dalej; z jednej strony do „wewnątrz”, aby osiągać coraz większą dokładność detali (szczegółów), z drugiej strony zaś na „zewnątrz”, aby uzyskać szerszy przegląd współzależności. Pokazuje to schematycznie rysunek 11, który „zapakowane w siebie” poziomy opisu określa jako hierarchię.



Rys. 11. Hierarchie hamulca mechatronicznego: elektroniczna (z lewej) i mechaniczna (z prawej)

Spójrzmy najpierw na poziomy „zewnątrzne” czy „wyższe”. Zostały one zbudowane dopiero w ostatnich latach i nie dotyczą jeszcze wszystkich hamulców. Zawierają one dziesiątki mikroprocesorów i są instalowane w samochodach osobowych wysokiej klasy.

Jeżeli zmienimy perspektywę wymiarów z bardzo, bardzo dużych na bardzo, bardzo małe, to, jak widać z rysunku 11 (z lewej), w mikrokomputerze mamy mikroprocesory a w tych ostatnich tak zwane chipy. Są to płytki z materiału półprzewod-

nikowego o powierzchni jeden do dwóch centymetrów kwadratowych i grubości paru milimetrów. W płytkach tych, w odpowiednio ułożonych cieniutkich warstwach, umieszczonych jest kilka milionów elektronicznych, logicznych obwodów przełączających. Taki obwód składa się z najmniejszych jednostek komputera: z tranzystorów, kondensatorów, oporników itd. W ten sposób dochodzimy do zasady elektronicznego przetwarzania danych.

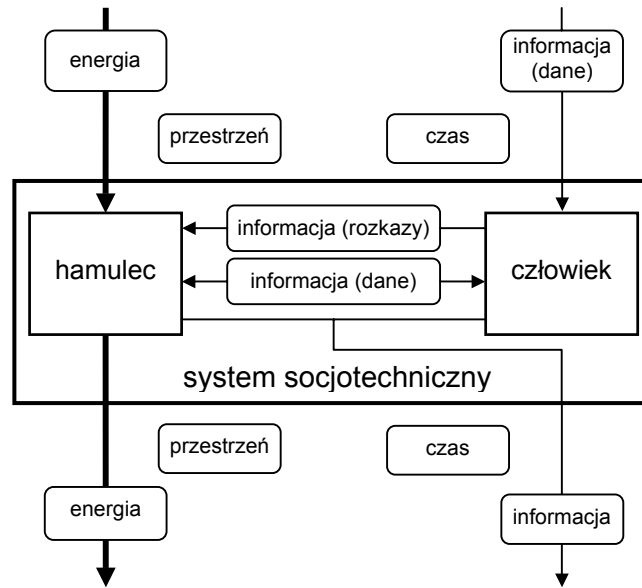
Możemy oczywiście pozostać przy perspektywie klasycznej, mechanicznej (rys. 11 z prawej). Wtedy w hamulcu mamy mechanizm zaciskowy, a w nim szczęki z wykładziną wykonaną z odpowiedniego materiału ciernego. W ten sposób dochodzimy do zasady działania hamulca ciernego.

Opis socjotechniczny

Inżynier mechanik, elektronik czy informatyk zwykle ukierunkowany jest na takie rozumienie techniki, które uwzględnia tylko zrobienie jakichś rzeczy, a nie ich zastosowanie przez człowieka. Jest to wąskie pojęcie techniki, według którego hamulec wystarczająco jest zdefiniowany za pomocą rysunku 9. Energia, a szczególnie informacja, którą hamulec przetwarza, wydaje się jakby spadać z nieba, a jego wyniki płyną w nieokreślonej próżni. Ponieważ jednak hamulec w rzeczywistości nie prowadzi żadnego izolowanego, własnego życia, lecz funkcjonuje tylko przez ludzi i dla ludzi, zastąpimy rysunek 9 rysunkiem 12, który łączy hamulec z człowiekiem w jednostkę roboczą, w której w ogóle dopiero wtedy może odbywać się sensowna obróbka informacji. Hamulec staje się rzeczywiście hamulcem dopiero wtedy, gdy staje się częścią jednostki człowiek-maszyna. Jeżeli następuje hamowanie samochodu, to czyni to nie sam człowiek, ale również nie sam hamulec, który hamuje; dopiero jednostka złożona z człowieka i hamulca wprowadza stan hamowania pojazdu. Fakt, że w użytkowanym hamulcu zawsze już ucieleśniona jest praca innych ludzi, powoduje więc, że jednostka człowiek-maszyna nie tylko tworzona jest przez pojedynczego użytkownika, lecz także współtworzona przez innych ludzi. Dlatego możemy ją nazwać systemem socjotechnicznym.

Gdy człowiek i hamulec mechatroniczny rzeczywiście przedstawiają niepodzielną jednostkę działania, chciałoby się oczywiście wiedzieć, jaki udział w tej wspólnej pracy ma człowiek, a jaki hamulec. O urządzeniach mechatronicznych mówi się często, że są to urządzenia inteligentne, gdyż sterowane są komputerem. Ale czy inteligencja polega na zastosowaniu komputera? W tym miejscu warto przypomnieć dawniejsze popularne nazwy komputera, jak „maszyna myśląca” czy „mózg elektronowy”. Nazwy te sugerowały, że komputer w pełni zastępuje pracę umysłową człowieka. To, że dziś nie używamy tych metafor, należy przypisać tak zwanym naukom kognitywnym (naukom o poznawaniu), które tymczasem się rozwinęły i bardzo zmieniły wyobrażenia o procesach myślowych człowieka. Myślenie człowieka może przebiegać w bardziej złożony sposób niż przebiegają procesy obróbki informacji w dziś rozpowszechnionych komputerach i w urządzeniach mechatronicznych. Mimo to określone formy ludzkiej działalności umysłowej mogą być całkowicie odwzorowane i przez to zastąpione przez komputer. Podczas rachowania jest to zupełnie oczywiste, a nawet podczas gry w szachy, co zawsze było

uznawane jako ogromne osiągnięcie inteligencji człowieka, komputer pokonał tymczasem mistrza świata. Komputer jest więc całkowicie w stanie, w określonych jednoznacznie opisanych czynnościach inteligencji, zastąpić człowieka. Taką czynnością jest przede wszystkim wnioskowanie logiczne.



Rys. 12. Hamulec w systemie socjotechnicznym

W tego rodzaju działaniach inteligentnych komputer przewyższa człowieka nawet wielokrotnie. Jeżeli nasz mały komputer (kalkulator) wykonuje obszerne zadanie rachunkowe, które za pomocą ołówka i papieru zajęłoby nam cały miesiąc, w ciągu jednej dziesiątej sekundy, to czyni on coś więcej niż tylko zastępuje nas. Nie tylko zastępuje bowiem naszą umiejętność rachowania, ale wzmacnia ją o kilka rzędów. Przez dostarczanie użytecznych rozwiązań w krótszym czasie tworzy więc całkowicie nowe możliwości, dla których w przeciwnym razie nigdy nie chcielibyśmy liczyć cały miesiąc. Albo dostarcza on we właściwym czasie, jeżeli weźmiemy jako przykład prognozę pogody, pożądaných wyników, które rachujący ludzie, jeżeliby ci ostatni poddali się takiej pracy, otrzymaliby dopiero wtedy, gdy pogoda ta już dawno przestałaby istnieć. Jeżeli więc komputer może przejąć ludzkie czynności umysłowe, to wzmacnia je przez to w takiej mierze, że można mówić o nowej jakości obróbki informacji.

Na ciągle powracające pytanie: „Czy komputer może myśleć?” należy więc odpowiedzieć – z ograniczeniami tak. Spór między filozofami a informatykami, który trwa już prawie pół wieku, dotyczy przede wszystkim pytania, jak te ograniczenia w szczególności należy określić i czy obowiązują one tylko w dzisiejszym stadium rozwoju czy w istocie zawsze. Są informatycy, którzy wierzą, że komputer w przyszłości nie tylko całkowicie zastąpi ludzkie czynności umysłowe, ale nawet będzie

w stanie rozwinąć dodatkowe zdolności, które dla człowieka są nieosiągalne. Przy takim punkcie widzenia komputer byłby kolejnym najwyższym etapem rozwojowym w ewolucji. Człowiek przestałby wtedy być „koroną stworzenia” i zostałby prześcignięty przez perfekcję komputera. Inni obserwatorzy – do których również należą krytyczni informatycy – występują przeciw tego rodzaju oczekiwaniom. Uważają bowiem, że takie świadome zdolności jak samorefleksja, samokrytyka, kreatywność i rozumienie sensu nie mogą być, z samej zasady, oddzielone od osób i dlatego nie można ich zobiektywować w programach komputerowych. Odpowiedzią na te sporne pytania, jak zawsze, będzie przyszły rozwój. Powstaje przy tym cały wachlarz zasad technizacji: od zastąpienia prostych ludzkich zdolności, przez ilościowy ich wzrost, aż do wytworzenia kompetencji ponadludzkich.

Ten krótki przegląd warunków i skutków zastosowania urządzeń mechatronicznych nie jest oczywiście całkowity. Powinien on jednak uzmysłwić nam wszystkim, że technikę mechatroniczną można zrozumieć dopiero wtedy, gdy wyjdzie się poza przedmiot techniczny i popatrzy się, co się dzieje podczas jego użytkowania.

Zanim hamulec będzie użytkowany, musi oczywiście zostać wytworzony. Dlatego systemowe podejście do urządzenia mechatronicznego musi ujmować również zasady jego rozwoju i produkcji. Hamulec mechatroniczny, jak to pokazaliśmy w opisie strukturalnym, jest produktem stosunkowo złożonym i nie jest możliwe w ramach przykładu wprowadzającego pokazać przebieg powstawania wszystkich jego części składowych. Hamulec mechatroniczny nie jest również żadnym jednorodnym, w sobie skończonym produktem, który jako całość zostałby opracowany przez określone przedsiębiorstwo w jednym miejscu pod tym samym kierownictwem. Hamulce mechatroniczne są raczej produktami modularnymi (klockowymi), których komponenty pochodzą od różnych wytwórców rozsianych po całym świecie.

Podczas gdy wynalazki klasyczne polegają głównie na tym, że zostaje rozpoznana użyteczność jakiegoś niewykorzystywanego do tej pory efektu dla zaspokajania ludzkich potrzeb, „wynajdowanie” urządzeń mechatronicznych w zasadzie nie jest niczym innym jak powiązaniem kilku już znanych rozwiązań technicznych: do mechanicznie działającego hamulca, napędu elektrycznego przyłączona została elektroniczna obróbka danych w wysoce zintegrowanych układach przełączających. Dla łatwiejszej orientacji rozróżnia się tu rozwój sprzętu i rozwój oprogramowania, a więc to, co w języku fachowym nazywa się „hardware” i „software”. W istocie obie te gałęzie znajdują się w ciągłym wzajemnym oddziaływaniu.

Podsumowanie

Przedstawiony przykład pokazał nam, że z czysto technicznego punktu widzenia urządzenie mechatroniczne od urządzenia klasycznego różni się przede wszystkim intensywnością obróbki informacji i intensywnością oddziaływań sterujących, jakie w nim zachodzą podczas spełniania pożądaných funkcji. Formalną miarą tej intensywności jest liczba przełączeń w jednostce czasu, dochodząca dziś do miliardów przełączeń na sekundę. Jest to o kilka lub nawet kilkanaście rzędów więcej niż w urządzeniach tradycyjnych. Każde z tych przełączeń, to w zasadzie nowy stan wewnętrzny lub zewnętrzny urządzenia. Skutkiem tego są nowe fascynujące moż-

liwości rozwoju techniki mechatronicznej, które jednak można w pełni zrozumieć i wykorzystać dopiero wtedy, gdy wyjdzie się poza przedmiot techniczny i popatrzy się, co się dzieje podczas jego użytkowania. Niezbędne jest więc ujęcie całościowe, systemowe i wykraczające poza samą technikę.

Przykład hamulca mechatronicznego będzie służyć nam do konkretyzowania abstrakcyjnych pojęć i modeli systemowych urządzenia mechatronicznego. Zanim jednak do tych modeli przejdziemy, poznajmy bliżej podstawę, na której opieramy naszą analizę systemową urządzenia mechatronicznego – systemową teorię techniki, opracowaną przez G. ROPOHLA.

3. Systemowa teoria techniki

Współczesny niemiecki filozof i socjolog techniki Günther ROPOHL (ur. 1939) wychodzi z założenia, że z fantastycznym osiągnięciem kulturowym ludzkości, jakim jest technika, nie uporano się jak dotąd w sensie ogólnym ani praktycznie ani teoretycznie. W wielu dyscyplinach istnieją oczywiście podejścia do ogólnych badań techniki, ale nie sięgają one tak daleko, aby wytworzyć obszerne zrozumienie techniki. Dlatego ROPOHL proponuje szerokie pojęcie (metapojęcie) techniki, obejmujące zarówno użyteczne, sztucznie wytworzone rzeczy-przedmioty, jak również działania socjokulturowe, w których te rzeczy powstają i są stosowane. Technika ma tu wymiar przyrodniczy, ludzki i społeczny. Każdy z tych wymiarów można traktować z różnych perspektyw poznawczych, które można przyrównać do poszczególnych dyscyplin naukowych. Żadna z tych perspektyw, nie może rościć sobie prawa do wyłącznego reprezentowania problemów techniki. Złożoność techniki daje się bowiem ująć tylko interdyscyplinarnie a narzędziem do takiego ujęcia może być teoria systemów. W rozdziale tym chcę przedstawić podejście ROPOHLA do teorii systemów i systemowej teorii techniki na podstawie jego książek: *Systemtheorie der Technik* (1979) i *Allgemeine Technologie* (1999).

Koncepcje, pojęcia i znaczenie ogólnej teorii systemów

Trzy koncepcje teorii systemów

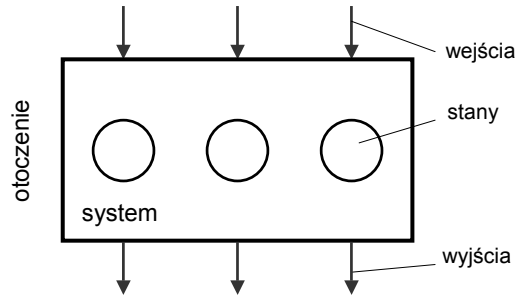
W ogólnej teorii systemów istnieją trzy różne ujęcia systemu. Każde z tych ujęć stawia (a nawet absolutyzuje) jeden z aspektów systemowych, podczas gdy pojęcie systemu w rzeczywistości obejmuje wszystkie trzy aspekty. Są to: funkcjonalna, strukturalna i hierarchiczna koncepcja systemu.

Najbardziej rozpowszechniona jest *koncepcja strukturalna*, przedstawiona schematycznie na rysunku 13b. Polega ona na tym, że system traktowany jest jako całość wzajemnie powiązanych elementów. Ujęcie takie wyraża zasadę holistyczną, że całość jest czymś więcej niż zwykłą sumą części; to *więcej* istnieje w relacjach między tymi elementami. W ujęciu tym chodzi o różnorodność możliwego splecenia zależności, które istnieją w danym zbiorze elementów i przez to mogą wywoływać zróżnicowane właściwości systemu. Z drugiej strony koncepcja ta zajmuje się również właściwościami elementów, od których zależy, jak dobrze dają się one zintegrować w jeden system. Strukturalne myślenie systemowe wychodzi z założenia, że części nie należy traktować jako wyizolowanych od ich kontekstu, lecz widzieć je w ich wzajemnej współzależności z innymi częściami.

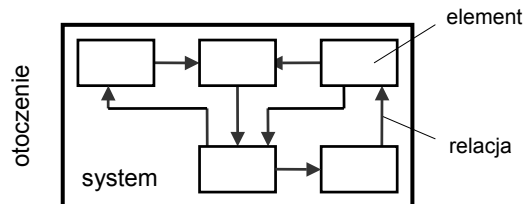
W *koncepcji funkcjonalnej* system przedstawia się jako „czarną skrzynkę” (black box) i charakteryzuje się przez określone współzależności między swymi właściwościami, które należy obserwować z zewnątrz. Rysunek 13a pokazuje, że do tych właściwości należą przede wszystkim wielkości wejściowe (inputs), wyjściowe

(outputs) oraz stany, którymi opisuje się zachowanie systemu. Taki sposób podejścia uogólnia koncepcję modelu, który można spotkać w naukach doświadczalnych, np. schemat bodziec-reakcja w behawioryzmie; także w życiu codziennym, jak to ma miejsce w przypadku obchodzenia się z przedmiotami technicznymi, gdy np. po naciśnięciu guzika oczekujemy obrazu na ekranie telewizora, nie mając pojęcia o tym co się dzieje w środku telewizora. Funkcjonalne myślenie systemowe abstrahuje wyraźnie od materialnej konkretyzacji i wewnętrznej budowy systemu i ogranicza się do zachowania całości w jej otoczeniu; rozpatruje nie rzeczy lecz sposoby zachowania; nie pyta „czym jest ta rzecz?”, lecz „co robi ta rzecz?”.

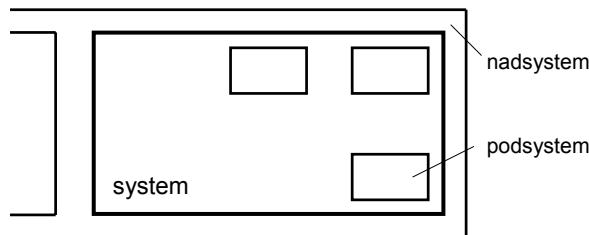
a) koncepcja funkcjonalna



b) koncepcja strukturalna



c) koncepcja hierarchiczna



Rys. 13. Koncepcje teorii systemów

I wreszcie *koncepcja hierarchiczna* podkreśla okoliczność, że części systemu mogą być widziane znowu jako systemy, sam zaś system jako część systemu szerszego. Z rysunku 13c widać, że w pierwszym przypadku mówimy o podsystemach (subsystemach), w drugim zaś o nadsystemach (supersystemach). Istnieje więc wiele poziomów Całości i Części, przy czym Całość jest Częścią kolejnego następnego wyższego, a Część tworzy Całość następnego poziomu niższego. Obszerne rozpatrywanie systemu może obejmować wiele poziomów jego hierarchii. Jeżeli poruszamy się w dół hierarchii, to otrzymujemy szczegółowe objaśnienie systemu, a gdy poruszamy się w górę, to głębiej zaczynamy rozumieć jego znaczenie. W ten sposób myślenie systemowe jest otwarte na obie strategie poznania: (1) na coraz głębszą analizę szczegółów, jak również na (2) coraz szerszą syntezę współzależności.

Te trzy koncepcje systemu nie wykluczają się wzajemnie. Przeciwnie, można je łatwo ze sobą połączyć. Zaczynamy na przykład od funkcji badanego przedmiotu, następnie pytamy o budowę wewnętrzną, z której objaśniamy funkcję i na koniec rozważamy największą współzależność, w której przedmiot badania jest osadzony. Dziwnym sposobem tego rodzaju podejście nie rozwinęło się w klasycznej literaturze systemowej do obszernej definicji systemu. Dlatego ROPOHL spróbował powiązać wszystkie trzy definicje cząstkowe w jedną, która uwzględniałaby wszystkie trzy koncepcje. Definicja ta i inne definicje dają się całkiem elegancko sprecyzować za pomocą algebry zbiorów. Niektóre poniżej użyte przedstawienia graficzne są w istocie obrazami wyrażen algebry zbiorów. Wychodząc z podstawowych reguł dydaktyki, ułatwiających zrozumienie, ROPOHL przedstawia swoją teorię najpierw w opisie naturalnym a na koniec dopiero w abstrakcyjnej symbolice teorii zbiorów.

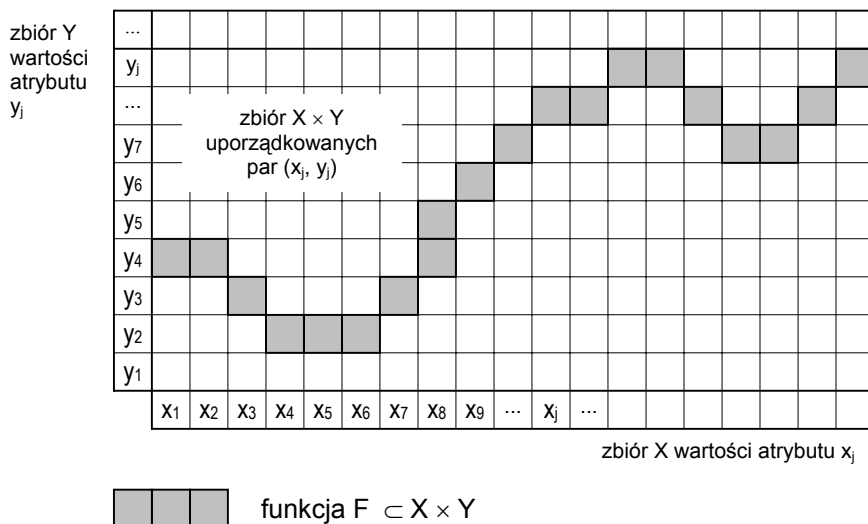
Definicja systemu

ROPOHL definiuje system następująco: System jest modelem Całości, która (a) wykazuje zależności między atrybutami (wejścia, wyjścia, stany itd.), (b) składa się ze wzajemnie powiązanych części lub podsystemów i (c) odgraniczona jest przez swoje otoczenie lub przez nadsystem. Definicja ta jednoczy trzy koncepcje systemowe z rysunku 13; (a) definiuje funkcję, (b) strukturę a (c) hierarchię. Gdy opisuje się wszystkie trzy aspekty, to mamy do czynienia z pełnym modelem systemowym. W literaturze szeroko rozpowszechnione są „słabsze” definicje systemu. Ujmują one tylko atrybuty i funkcje lub tylko elementy i relacje. Ma to sens, ponieważ niektóre teorie systemów „pracują” na takich ograniczonych modelach systemu. System funkcjonalny według (a) i system strukturalny według (b) są ponadto formalnie równoważnymi interpretacjami tego samego wyrażenia matematycznego, a mianowicie obrazu relacji: Najpierw przyjmuje się atrybuty jako „elementy” a funkcje między atrybutami jako „relacje”, a w innym przypadku podsystemy jako „elementy”, tak zwane zaś zależności czy sprzężenia między podsystemami jako „relacje”.

Pojęcie funkcji

Powyższy tok myślowy ma znaczenie dla zrozumienia *pojęcia funkcji*. Dla przypadku najprostszego system wykazuje tylko dwa atrybuty: wejście X i wyjście Y

(rys. 14). Wejście jest zbiorem wartości x_j a wyjście zbiorem wartości y_j . Każda para (x_j, y_j) oznacza określone pole w diagramie, a całość pól odwzorowuje wszystkie możliwe przyporządkowania wartości x_j i y_j . Funkcja podaje jednak, że w rozpatrywanym przypadku nie występują wszystkie możliwe przyporządkowania, lecz tylko ściśle określone, np. (x_1, y_4) , (x_2, y_4) , (x_3, y_3) itd., wyróżnione na rysunku jako ciemne pola. Tak więc funkcja polega na tym, żeby każdą wartość x z X powiązać z jedną wartością y z Y ; opisuje więc, jakie powiązania wartości wejściowych z wartościami wyjściowymi mają miejsce a jakie nie. W schemacie tym występują również przyporządkowania wielokrotne, a więc dla wielu wartości x ta sama wartość y , i odwrotnie, inaczej niż to ma miejsce dla ścisłego pojęcia funkcji w czystej matematyce; w ten sposób uwzględniliśmy konwencje matematyki stosowanej.



Rys. 14. Pojęcie funkcji w teorii systemów

Łańcuch zaciemnionych pól można potraktować jako linię krzywą i zobaczyć wykres, jaki zna się z matematyki dla funkcji $Y = f(X)$. Takie funkcje zwykle definiuje się dla liczb rzeczywistych. Uogólnione pojęcie funkcji pokrywa również zakresy dyskretne, np. zakresy algebry logicznej, która zna tylko wartości 0 i 1. W istocie wyrażenia atrybutów x_j i y_j nie muszą być liczbami, mogą występować jako wyrażenia jakościowe; funkcja jest wtedy zapisywana jako tabela, jak np. tabela prawd dla funkcji logicznych.

Powyższy opis powiązania między atrybutami systemu ustala *deskryptywne pojęcie funkcji*. Takie pojęcie funkcji jest oczywiste w matematyce i fizyce. Natomiast w biologii i naukach społecznych istnieje *teleologiczne pojęcie funkcji*, które słowo „funkcja” rozumie w sensie przeznaczenia, „celu, jakiemu coś służy”. Oba pojęcia funkcji można zilustrować przykładem skrzyni biegów w samochodzie. Skrzyni biegów można przypisać funkcję przekształcania dużej liczby obrotów i małego mo-

mentu obrotowego silnika w małą liczbę obrotów i duży moment obrotowy kół napędowych. Jest to deskryptywne pojęcie funkcji, jak w wyżej pokazanym schemacie. Mówi się również, że „funkcja” skrzyni biegów polega na tym, aby liczbę obrotów i moment obrotowy kół napędowych dopasować do każdorazowych wymagań kierowcy; jest to teleologiczne pojęcie funkcji, ponieważ tymi samymi słowami można scharakteryzować przeznaczenie (cel) skrzyni biegów. Cel jednak leży poza rozważanym systemem i implikuje jakąś instancję, która cel ten postawiła.

Relacje, sprzężenia, otoczenie

Część (b) definicji systemu opisuje *strukturę* jako zbiór relacji między częściami systemu; między funkcją i strukturą istnieje formalny stosunek dualności, ponieważ opisują one współzależności odbijające się w zwierciadle. Relacje mogą przedstawiać nie tylko zależności w czasie lub w miejscu, ale również inne zależności między dwiema lub więcej częściami systemu. Różnorodność możliwych relacji powoduje, że te same części mogą tworzyć różne systemy. Można to sobie uzmysłwić za pomocą prostego przykładu rachunkowego: Gdy między pięcioma częściami systemu istnieją tylko relacje dwucyfrowe w sensie binarnym⁸, to ze wzoru na złożoność możemy wyliczyć dwadzieścia różnych relacji. W zależności od tego, jak dużo z tych relacji występuje, istnieje 2^{20} , a więc więcej niż milion różnych struktur systemu, od pojedynczego powiązania do bardzo gęstej sieci połączeń.

Częstą formą relacji dwucyfrowej jest *sprzężenie*. Można je sprecyzować, gdy część systemu potraktuje się jako podsystem z własnymi wejściami i wyjściami. O sprzężeniu mówi się wtedy, gdy wyjście jednego podsystemu staje się wejściem innego podsystemu. W podanym przykładzie skrzyni biegów istnieje sprzężenie energetyczne między silnikiem i skrzynią. Istnieje również przypadek szczególny, w którym w systemach sprzężonych dodatkowo wyjście drugiego staje się wejściem pierwszego; wtedy mówi się o *sprzężeniu zwrotnym*. Sprzężenie zwrotne jest podstawą regulacji. Regulacja, w przeciwieństwie do prostego sterowania przyczynowego, jest sterowaniem skutkowym, zależnym od wyniku.

Aby jakiś system zidentyfikować, trzeba go odgraniczyć od tego Innego, co do systemu nie należy. To Inne nazywa się *otoczeniem* systemu. Wszystkie zjawiska, które nie są zdefiniowane jako cechy systemu, tworzą więc jego otoczenie. Jest ono dowolnie obszerne i bogate. Ponieważ opis systemu nie może oczywiście przedstawiać całego świata, do rozważań bierze się tylko takie części otoczenia, które dla opisu systemu mają znaczenie z jakiegoś punktu widzenia. Ten etap badań można sprecyzować przez ujęcie ważnych części otoczenia jako nadsystemu, a więc gdy uwzględni się hierarchię systemów z części (c) definicji podstawowej. Jeżeli system ma się składać z podsystemów, to zgodnie z naszym tokiem myślenia, dopuszczalny jest wniosek analogiczny, że również rozpatrywany system w większym powiązaniu systemowym funkcjonuje znowu jako podsystem. Formalnie etapy te mogą być dowolnie powtarzane w „górze” i w „dół”, jakby hierarchia zawierała nieskończenie wiele poziomów. W interpretacjach empirycznych ograniczamy się jednak zwykle tylko do paru etapów.

⁸ Dwucyfrową liczbą dwójkową można opisać cztery stany (00, 01, 10, 11)

Chaos, synergetyka, samoorganizacja

Za pomocą przedstawionych dotychczas pojęć i dalszych uszczegółowień można scharakteryzować liczne cechy szczególne modeli systemowych. Cechy te można „potraktować” szczegółowymi teoriami systemowymi. Do naszkicowanego tu szkieletu podstawowego można przyłączyć nowe koncepcje teorii systemów. Istnieją modele funkcjonalne, w których liczne, niezależne atrybuty powiązane są w taki sposób, że w efekcie ustalają się wyniki nieprzewidywalne. Chodzi tu o tak zwaną teorię chaosu i teorię zwaną synergetyką, która usiłuje wyjaśnić zjawisko dominowania wartości pewnych atrybutów. Strukturalnymi modelami systemowymi, wychodzącymi ze zjawiska wzajemnego oddziaływania, opisujemy wyniki, które powstają ze współdziałania lub przeciwdziałania podsystemów; takie badania często zalicza się do teorii gier. Istnieją ambitne modele systemowe o dynamicznej strukturze, które próbują wyjaśnić, jak systemy mogą się zmieniać i rosnać ze względu na liczbę i właściwości swych części i swych relacji. Są to teorie samoorganizacji, autopoezji i emergencji.

Pojęcie informacji

Pojęcie *informacja* towarzyszy teorii systemów od dawna. Po pierwsze teoria informacji jest szczególną teorią systemową, ponieważ informację można formalnie opisać jako różnorodność struktury systemowej. Po drugie mamy do czynienia z systemami, w którym informacja jest przetwarzana, jak to ma miejsce w przypadku teorii regulacji zajmującej się systemami sterowania i regulacji. Z tego powodu informacja wchodzi w grę także podczas opisu innych typów systemu, o ile występują procesy sterowania i regulacji. N. WIENER w swojej podstawowej książce o cybernetyce sformułował słynne potem zdanie: „Informacja jest informacją, ani masą, ani energią”. Wyrażenie to nie jest oczywiście żadną definicją, ale zawiera bardzo ważne stwierdzenie, że informacja, obok masy i energii, stanowi trzecią podstawową kategorię opisu świata. Koncepcja ta jest niezbędna dla socjotechnicznego opisu systemu, przynajmniej jako heurystyczne pojęcie modelowe.

Okazuje się bowiem, że systemów cybernetycznych nie można w pełni zrozumieć, jeżeli rozważa się tylko procesy materiałowe i energetyczne. Okazuje się również, że procesy informacyjne z zasady nie mogą być sprowadzone do procesów materiałowych i energetycznych. Informacją nazywa się to, co w wiadomości (w przesłaniu) pozostaje niezmiennie, również gdy przyjmuje ona jeden po drugim różne fizyczne formy zjawiska; w ten sposób informacja może być definiowana, „jako klasa równoważnych sygnałów”.

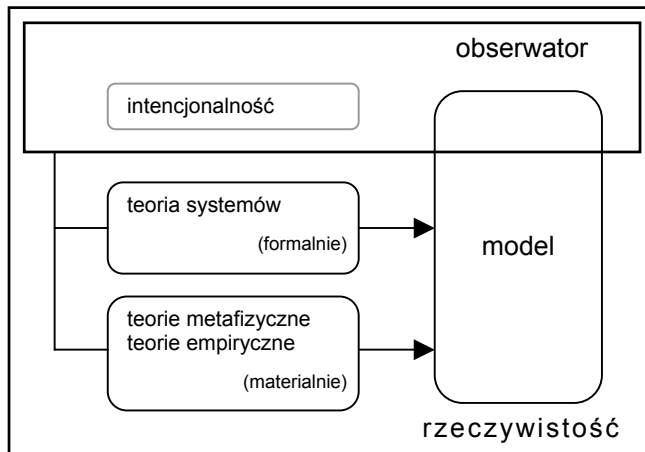
Jeżeli włączy się do tego teorię znaków, to można tę definicję wzmocnić następująco: Informacja jest znakiem ze zbioru znaków, który (a) jest zdarzeniem fizycznym i występuje z określoną częstością lub prawdopodobieństwem (wymiar syntaktyczny), który (b) ma określone znaczenie przypisywane mu przez konwencję (wymiar semantyczny) i który (c) ma określone odniesienie do zachowania się jego użytkownika (wymiar pragmatyczny). Syntaktyczne pojęcie informacji ma charakter strukturalny i stąd może być precyzowane z punktu widzenia teorii systemów jako różnorodność, a mianowicie jako dwójkowy logarytm liczby różnych elementów

zbioru znaków; dlatego liczba ta obowiązuje również jako miara złożoności układu. Jeżeli znaki występują w nietrywialnym przypadku z różną częstością lub prawdopodobieństwem, to złożoność wchodzi w matematyczne formułowanie syntaktycznego pojęcia informacji. W ten sposób staje się ono miarą porządku, gdy się założy, że równy rozkład jest identyczny z maksymalnym nieuporządkowaniem.

Znaczenie teorii systemów

Teoria systemów służy przede wszystkim jako instrument opisu, który najróżnorodniejsze perspektywy poznawcze techniki sprowadza do jednego wspólnego mianownika. Ten wspólny mianownik tworzą formalne kategorie modelowania, precyzowane przez teorię systemów. ROPOHL ujmuje teorię systemów jako teorię modelowania, która pomaga różnorodne obszary rzeczywistości opisać w tym samym języku i przez to odnosić wzajemnie do siebie. Porównuje ją z ujednoczonymi symbolami kartografii, używanymi w każdej mapie, niezależnie od tego jaki region odwzorowują. Mapa abstrahuje od szczegółów jak ludzie czy domy. Odzwierciedla przede wszystkim geograficzną strukturę regionu, aby ten, kto szuka miejscowości, mógł się w tym połąpać. Tak dzieje się również z modelami systemowymi: to, co modele opisują, jest w rzeczywistości, ale nie jest to cała rzeczywistość, lecz tylko to, co jest ważne dla twórcy lub użytkownika modelu.

Dlatego modele charakteryzują się trzema cechami: odwzorowaniem, skrótem i pragmatycznością. Oznacza to, że zastępują funkcje oryginału: (1) dla określonych podmiotów (poznających, działających, używających modelu), (2) wewnątrz określonego przedziału czasu i (3) ograniczają się do określonych operacji umysłowych lub rzeczywistych. Cechy te uzmysławia rysunek 15 i podaje dalsze warunki teorisystemowej konstrukcji modelu.



Rys. 15. Teoria systemów a konstrukcja modelu

Na rysunku przede wszystkim widać, że model zawsze tworzy jakiś obserwator wyrażając przez to określone intencje. Model pokrywa tylko kawałek rzeczywistości i uwzględnia obserwatora i jego stosunek do rzeczywistości. Sama ogólna teoria systemów oferuje tylko formalne klocki do budowania modelu. W przeciwieństwie do całkowicie abstrakcyjnej matematycznej teorii zbiorów zawiera ona jednak minimalne założenia o rzeczywistości. Zakłada przede wszystkim, że każdy przedmiot poznania i działania ma „stronę zewnętrzną” (funkcję) i „stronę wewnętrzną” (strukturę) oraz że umiejscowiony może zostać w jakimś układzie zróżnicowanych i obszernych powiązań, czyli w hierarchii. Te minimalne założenia oczywiście nie wystarczą, aby zbudować półrealistyczny model na przykład maszyny czy organizacji społecznej.

Jak pokazuje rysunek 15, oprócz formalnej teorii systemów potrzebne są do tego teorie materialne. Dostarczają one podstawowej wiedzy o specyficznych właściwościach tego wycinka rzeczywistości, który chce się opisać w modelu. W pierwszym rzędzie są to obserwacje i teorie. Gdy chce się opracować systemowy model techniki potrzebna jest więc wiedza teoretyczna i doświadczalna o formach i wynikach działania technicznego.

Trzeba też mieć wyobrażenie o pewnych podstawowych powiązaniach, które można nazwać teoriami metafizycznymi. Jeżeli na przykład obserwuje się pracę człowieka jako operatora maszyny i próbuje się tę pracę objaśnić za pomocą założeń metafizycznych, że między człowiekiem i maszyną dochodzi do symbiozy socjotechnicznej, to postuluje się transempirycznie egzystencjalny stosunek odniesienia. Tego rodzaju koncepcje przekonująco można ująć tylko językowo, nie można ich obserwować konkretnie.

System jest więc najpierw modelem formalnym, który dopiero potem interpretowany jest materialnie za pomocą teorii metafizycznych i empirycznych. Można przy tym rozróżniać wiele stopni rosnącej konkretyzacji, aż model systemu znacznie wystarczająco dokładnie odpowiadać zjawiskom empirycznym. Nie jest to żaden wywód logiczny, lecz interpretacja, która w swych różnych etapach stopniowo wzbogaca model formalny o dalszą informację. Dla tej interpretacji można stosować różne metody naukowe. Już w założeniu ogólna teoria systemów nie ogranicza się w żadnym przypadku tylko do metod matematyczno-przyrodniczych, lecz wykorzystuje również metody nauk humanistycznych, szczególnie hermeneutykę jako metodę interpretacji.

Tak jak wszystkie interpretacje, również tworzenie modeli systemowych nie jest więc dowolne. Ale nie jest też ograniczane do możliwości otrzymania tylko jednego jedynego poprawnego wyniku. Każdy model systemowy można krytykować, że nie jest wystarczająco reprezentatywny dla odwzorowanej rzeczywistości i niewystarczająco dokładny dla jego użytkowników. Jeżeli ktoś zarzuca modelowi systemowemu takie słabości, to musi podać tego powody, aby można było sprawdzić, jak go poprawić lub zastąpić przez inny.

Znaczenie ogólnej teorii systemów polega na tym, że oferuje ona jednolity język formalny do uporządkowanego opisu różnorodnych obszarów doświadczalnych. Opis taki pomaga odkrywać i precyzować podobieństwa tych obszarów, ich prze-

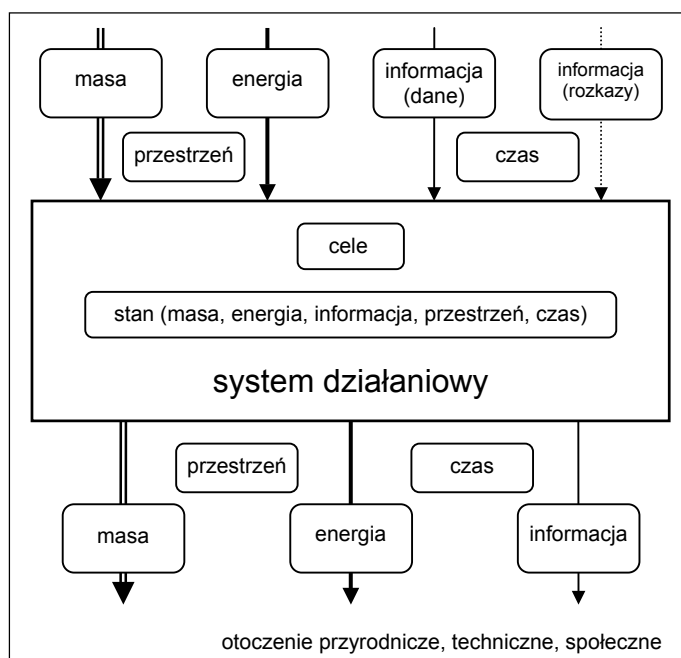
cięcia i powiązania. Przez to ogólna teoria systemów staje się owocnym narzędziem do syntezy badań interdyscyplinarnych. Centralne myśli przewodnie teorii systemów mają korzenie w filozofii. Występuje ona w trzech formach: (1) jako sposób życia, (2) jako dyscyplina naukowa i (3) jako ponaddyscyplinarne rozumienie świata. Ta trzecia forma poważnie traktuje wiedzę biorącą się z doświadczenia i dlatego można ją nazwać *filozofią empiryczną*. Teoria systemów jest dla filozofii empirycznej potężnym narzędziem umożliwiającym interdyscyplinarną integrację wiedzy specjalistycznej.

Systemy działaniowe

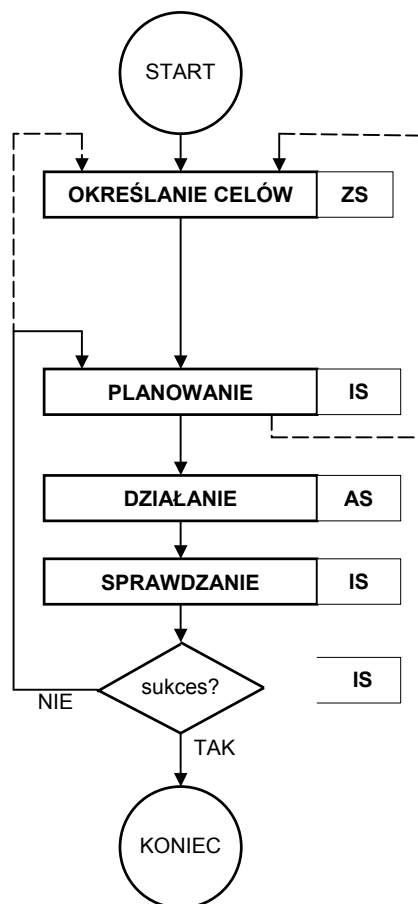
Systemowy model techniki wyprowadza ROPOHL z ogólnej teorii systemów i interpretuje go jako system działaniowy (niem. *Handlungssystem*). Pojęcie działania odgrywa kluczową rolę w filozofii, antropologii i naukach społecznych. Jest ono niezbędne do opisu powstawania i użytkowania rzeczy technicznych.

Pojęcie, funkcja, struktura zgrubna

Przez działanie (*Handlung*) rozumie ROPOHL funkcję systemu działaniowego, polegającą na tym, aby określone, charakterystyczne dla sytuacji początkowej wejścia (*inputs*), stany i cele tak przeprowadzić w stany i wyjścia (*outputs*) sytuacji końcowej, że cele zostaną spełnione. Wejścia, stany i wyjścia dają się przyporządkować trzem kategoriom – masie, energii i informacji – występującym w czasie i przestrzeni (rys. 16). Jeżeli rozłoży się funkcję działaniową, to przez obwód działaniowy (rys. 17) dochodzi się do teoretycznej struktury działaniowej.



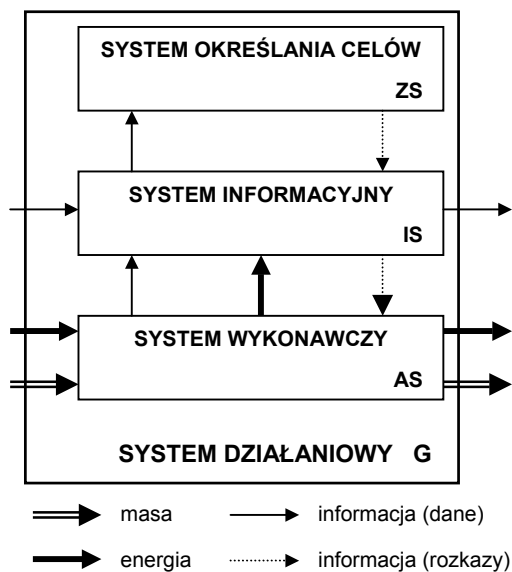
Rys. 16. Schemat blokowy systemu działaniowego



Rys. 17. Obwód działaniowy

W pierwszym przybliżeniu teoretyczna struktura działaniowa obejmuje rozkład całkowitej funkcji systemu na funkcje cząstkowe. Wykorzystuje się do tego heurystyczną zasadę analizy strukturalnej. Polega ona na tym, że: (a) przyporządkowuje się własne podsystemy kategoriom wejścia, stanu i wyjścia; (b) zakłada się peryferyjne podsystemy dla pobierania wejścia i wydawania wyjścia oraz (c) przewiduje się podsystemy wewnętrzne dla procesów transformacji leżących między wejściem i wyjściem. W ten sposób ROPOHL tworzy syntezę bardzo przydatną dla późniejszych rozważań. W pierwszym przybliżeniu obejmuje ona trzy podsystemy (rys. 18). Pierwszym jest *system wykonawczy AS (Ausführungssystem)*, któremu przypadają atrybuty materiałowe i energetyczne; system wykonawczy wykonuje więc pracę w ścisłym sensie. Drugim jest *system informacyjny IS (Informationssystem)*, który ma do czynienia z atrybutami informacyjnymi; w nim przebiegają te funkcje działaniowe, które pobierają, przerabiają i przekazują informację, a więc szczególnie służą komunikacji z innymi systemami działaniowymi. Trzecim jest

system określania celów ZS (*Zielsetzungssystem*), który wewnątrz systemu wytwarza cele jako maksymy działania. Na rysunku 18 strzałki pokazują, że cele nie zawsze określa się dowolnie, lecz także zależnie od informacji, jakie system działaniowy uzyskał przez zewnętrzne warunki otoczenia i własne możliwości działania.



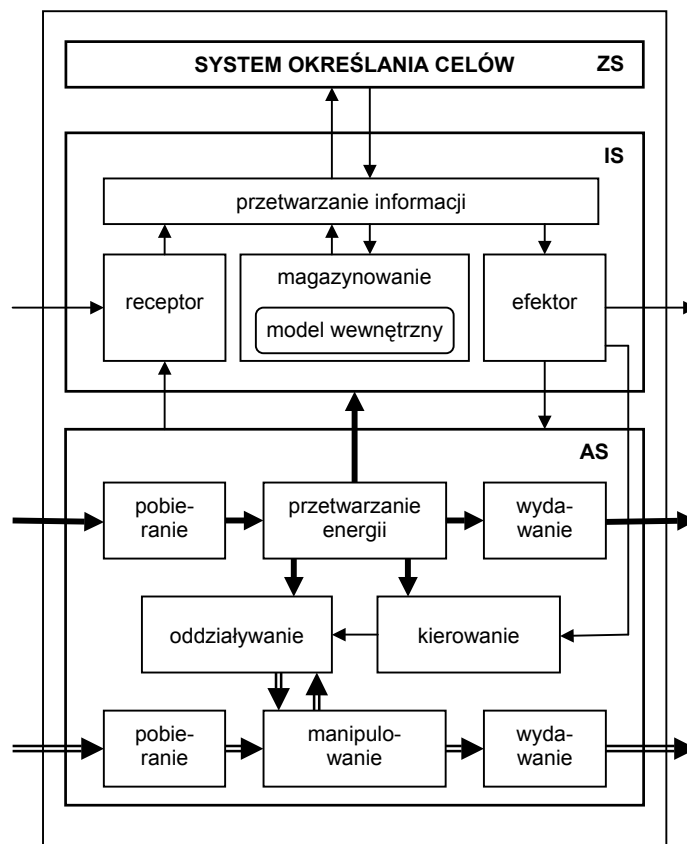
Rys. 18. Zgrubna struktura systemu działaniowego

Struktura dokładna

W drugim przybliżeniu struktury działaniowej dzieli ROPOHL system informacyjny i system wykonawczy na dalsze funkcje cząstkowe. W ten sposób powstaje jakby teoretyczna hierarchia systemu działaniowego; systemy cząstkowe z rysunku 18 można wtedy traktować jako podsystemy, systemy cząstkowe tych podsystemów (rys. 19) jako pod-podsystemy. Rozkład funkcjonalny systemu informacyjnego odpowiada podejściu cybernetycznemu. Za pobieranie informacji z otoczenia i z systemu wykonawczego odpowiada *system receptorowy*, często zwany również systemem sensorowym. *System efektorowy* przekazuje dalej informację do otoczenia i do systemu wykonawczego oraz przekazuje rozkazy w celu koordynacji funkcji wykonawczych. Między systemem receptorowym a efektorowym znajduje się *system przetwarzania informacji*, który ocenia i transformuje informację oferowaną oraz opracowuje informację nową. Ponieważ również porównuje on istniejący stan otoczenia i kondycję systemu z postawionymi celami i wywodzi z tego nowe polecenia dla systemu wykonawczego, spełnia także funkcję regulatora.

System przetwarzania informacji przejściowo współpracuje z *systemem magazynowania informacji*. Ten ostatni przechowuje informację wcześniej otrzymaną jako „doświadczenie” i przygotowuje ją przez procedury celowe lub skojarzeniowe; zde-

finiowane cele są również tu magazynowane (zapamiętywane). Ponieważ wszystkie te informacje są przynajmniej częściowo powiązane w uporządkowane wzorce (algorytmy), można mówić o *modelu wewnętrznym*, który w przybliżeniu odwzorowuje otoczenie systemu i jego kondycję. Jeżeli system przetwarzania informacji ma wiele możliwości działaniowych, to mogą być one, i ich każdorazowe skutki, najpierw „odegrane” w modelu wewnętrznym. O ile system receptorowy pracuje selektywnie, o tyle model wewnętrzny wpływa także na wybór spostrzeganych informacji.

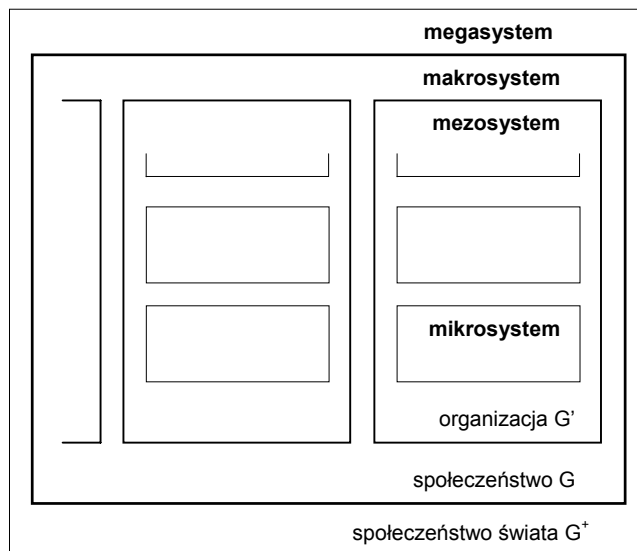


Rys. 19. Szczegółowa struktura systemu działaniowego

Podobnie jak system informacyjny, również system wykonawczy ma podsystemy peryferyjne, do których wchodzi wejścia i z których wydawane są wyjścia; zarówno dla energii jak i masy są to *systemy pobierania* i *systemy wydawania*. Między nimi leży z jednej strony *system przemiany energii* (*Energiewandlungssystem*), który pobiera energię i przemienia ją w formy wymagane przez inne podsystemy lub do odprowadzenia do otoczenia; z drugiej strony leży zaś *system manipulowania* (*Handhabungssystem*), który pobiera masę i przygotowuje ją do zmieniającego ją

oddziaływania i po przemianie sprowadza do systemu wydawania. *System oddziaływania* wykonuje bezpośrednią materiałową zmianę przedmiotów pracy. Wymagane do tego przebiegi ruchu rekonstruuje (z danych systemu informacyjnego) i realizuje (w przestrzeni i czasie) *system kierowania* (*Führungssystem*).

Rysunek 19 uzmysławia jedynie teoretyczny model rozkładu funkcji. Bloki, nazwane podsystemami, nie są rzeczywistymi komponentami, lecz przede wszystkim idealizowanymi abstrakcjami. Przykładowo funkcja cząstkowa pobierania informacji jest modelowana jedynie systemem receptorowym, mimo że empiryczne systemy działania podczas realistycznej analizy mają zawsze wiele systemów receptorowych; ludzie mają organy zmysłu, a organizacje odbierają wiadomości z otoczenia różnymi drogami. System receptorowy w modelu reprezentuje więc wszystkie te różne cechy pobierania informacji. Podobnie jest dla innych podsystemów. Ponadto strzałki nie zawsze ukazują czyste sprzężenia, lecz mogą dodatkowo symbolizować funkcję przenoszenia⁹.



Rys. 20. Hierarchia ludzkich systemów działaniowych

Ludzkie systemy działaniowe i ich hierarchia

Ten abstrakcyjny model systemu działaniowego konkretyzuje ROPOHL w dalszym etapie interpretacji empirycznie w dwojaki sposób:

1. jako ludzki system działaniowy (*menschliches Handlungssystem*),
2. jako sztuczny system rzeczowy (*künstliches Sachsystem*).

⁹ W polskiej terminologii automatyki zwykle zamiast „funkcja przenoszenia” używane jest słowo „transmitancja”. Obce, łacińskie brzmienie sugeruje, że ma ono takie samo znaczenie w innych językach. Tak jednak nie jest, wystarczy zajrzeć do słownika języka angielskiego, niemieckiego czy rosyjskiego.

Ludzkie systemy działania ujawniają się w trzystopniowej hierarchii (rys. 20):

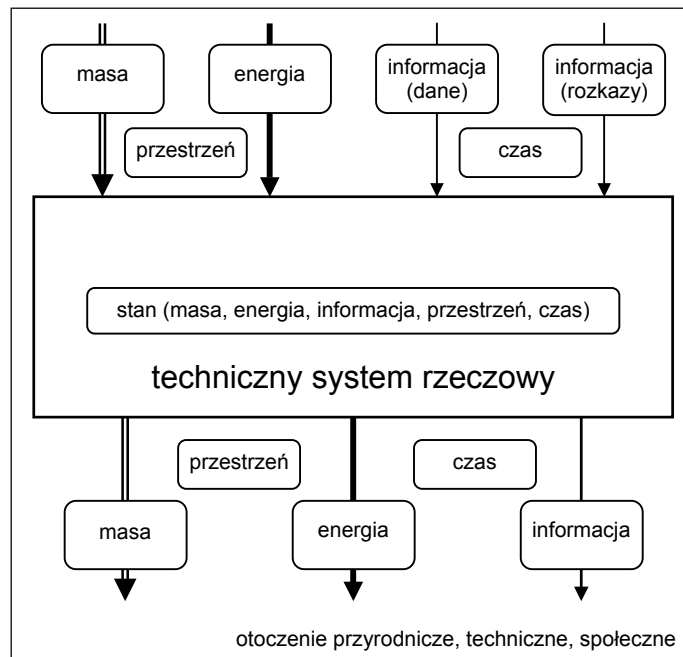
- systemy osobowe na poziomie małym (mikrosystemy),
- indywidualne osoby, łączące się w systemy społeczne na poziomie średnim (mezosystemy),
- grupy, organizacje itd. – tworzące makrosystem społeczności.

Mając na uwadze coraz głębsze tendencje globalizacyjne trzeba też widzieć megasystem społeczności światowej.

Systemy rzeczowe

Pojęcie i hierarchia

Jeżeli ogólny opis systemowy zastosujemy na rzeczy sztucznie wytworzone, to w pierwszym przybliżeniu empiryczną interpretacją abstrakcyjnego systemu działania jest system rzeczowy, jak na rysunku 21. Przy tym należy podkreślić istotną różnicę: systemy rzeczowe nie mają żadnego podsystemu ustalania celów a więc nie mają żadnych własnych celów.



Rys. 21. Schemat blokowy technicznego systemu rzeczowego

System rzeczowy jest sztucznym wytworem przedmiotowym zorientowanym na jego użytkowanie. System rzeczowy nie ma własnych celów. Reprezentuje on konkretne, sztuczne przedmioty, wykonane przez wykorzystanie zasobów naturalnych i będące namacalną rzeczywistością w czasie i przestrzeni. Wynika stąd, że sys-

temy rzeczowe, podobnie jak rzeczy dane przez przyrodę, podlegają prawom przyrody; ich funkcje wynikają z reguł fizykalnych, chemicznych czy biologicznych. Nie znaczy to wcale, że do opracowania systemu rzeczowego wystarczy tylko planowe stosowanie praw przyrodniczych. Często podczas takiego opracowywania (koncowania, konstruowania) odnośne prawa przyrody nie są znane; gdy zaś nawet są znane, to nie istnieje żadna automatyczna droga prowadząca od praw przyrodniczych do konkretnej realizacji technicznej.

Jak widać z rysunku 21, systemy rzeczowe znajdują się w otoczeniu przyrodniczym, technicznym i społecznym. Jeżeli nowy system rzeczowy wchodzi w otoczenie przyrodnicze lub społeczne, to zarazem ingeruje w przyrodę i społeczeństwo. System rzeczowy można traktować jako część pewnej hierarchii, szczególnie wtedy, gdy jego otoczenie potraktuje się jako nadsystem rzeczowy, a sam system potraktuje się jako złożony z podsystemów rzeczowych (rys. 22).



Rys. 22. Hierarchia systemów rzeczowych

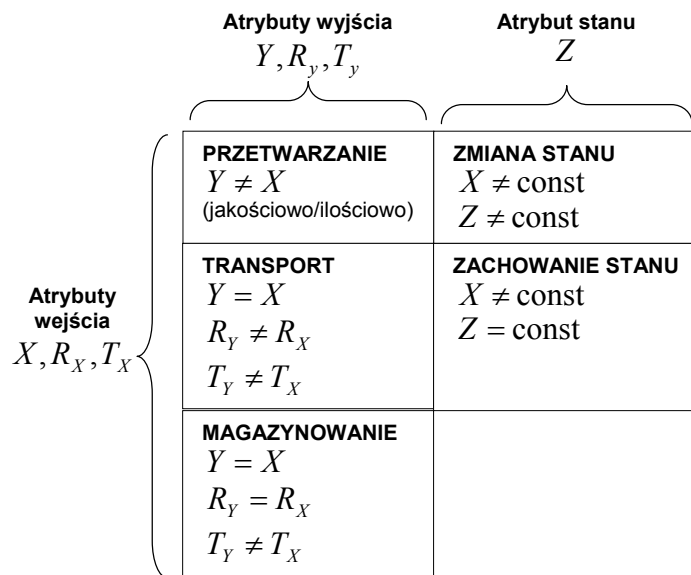
Funkcje

Funkcje systemów rzeczowych można zebrać w pięć klas (rys. 23).

Funkcja wynikowa polega na tym, aby wejście X , w zależności od czasu i przestrzeni, przetransformować w wyjście Y ; Y jest wynikiem transformacji X . W lewej połowie rysunku 11 widać podstawowe możliwości transformacji. O *przetwarzaniu* (*Wandlung*), przeróbce lub produkcji (w ścisłym sensie techniki rzeczowej) mówi się wtedy, gdy wyjście systemu rzeczowego jest inne niż wejście.

W dwóch kolejnych przypadkach w lewej połowie rysunku 23 wyjście pozostaje niezmienione w stosunku do wejścia, ale występują atrybuty przestrzenne i czasowe. Jeżeli między wejściem i wyjściem zmieniają się zarówno współrzędne miejsca jak i czasu, to mamy do czynienia z *transportem*. Jeżeli natomiast współrzędne miejsca pozostają stałe, a zmienia się tylko czas, to chodzi o *magazynowanie* (*Speicherung*).

W prawej połowie rysunku 23 mamy funkcje przeprowadzania wejścia w stan systemu. *Zmiana stanu* ma miejsce wtedy, gdy zmiana wejścia wywołuje zmianę stanu. Funkcja zachowania stanu polega zaś na tym, żeby utrzymać stały stan systemu w odniesieniu do zakłócającego wejścia.



R_x, R_y współrzędne przestrzeni; T_x, T_y współrzędne czasu

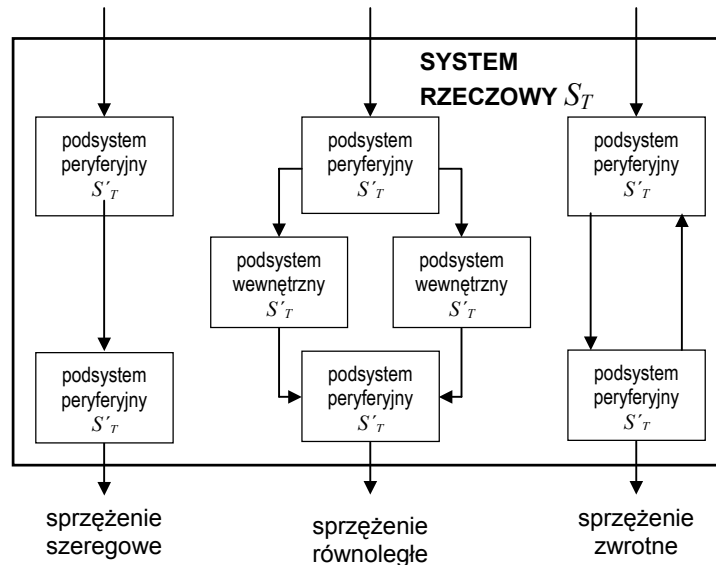
Rys. 23. Klasy funkcji systemów rzeczowych

Funkcja jest deskryptywną charakterystyką rzeczywistego zachowania się systemu i podaje to, co system rzeczywiście robi. Często produkty techniczne i metody techniczne przedstawia się tak, jakby chodziło o dwie różne klasy zjawisk. W istocie *metody techniczne* są niczym innym jak funkcjami systemów. Jeżeli przez metody techniczne rozumie się sposoby postępowania pracujących ludzi, to są one funkcjami systemów działaniowych lub systemów pracy; jeżeli zaś rozumie się operacje maszyn czy urządzeń, to są to funkcje systemów rzeczowych. Przekonującym przykładem mogą być znormalizowane metody wytwarzania: każdej metodzie wytwarzania, nazwanej w normie, odpowiada maszyna wytwórcza realizująca tę metodę. Produkty i metody produkcji są jedynie różnymi aspektami tej samej sprawy; w analizie teorisystemowej można je dokładnie ująć jako systemy rzeczowe i ich funkcje.

Struktury

Według stosunku systemu rzeczowego do otoczenia można rozróżnić podsystemy peryferyjne i podsystemy wewnętrzne. *Podsystemy peryferyjne* są powiązane z otoczeniem przez wejścia lub wyjścia. Podsystemy te przyjmują materiałowe, energetyczne i informacyjne wejścia z otoczenia lub wydają odpowiednie wyjścia do otoczenia. Natomiast *podsystemy wewnętrzne* są powiązane tylko z innymi podsystemami rozpatrywanego systemu rzeczowego; wykonują charakterystyczne dla systemu transformacje masy, energii lub informacji.

W relacjach między podsystemami rzeczowymi panuje sprzężenie (*Kopplung*). Struktura systemu rzeczowego składa się przede wszystkim ze sprzężeń materiałowych, energetycznych i informacyjnych. Rysunek 24 pokazuje główne formy sprzężenia: szeregowe, równoległe i zwrotne.



Rys. 24. Formy struktury systemu rzeczowego

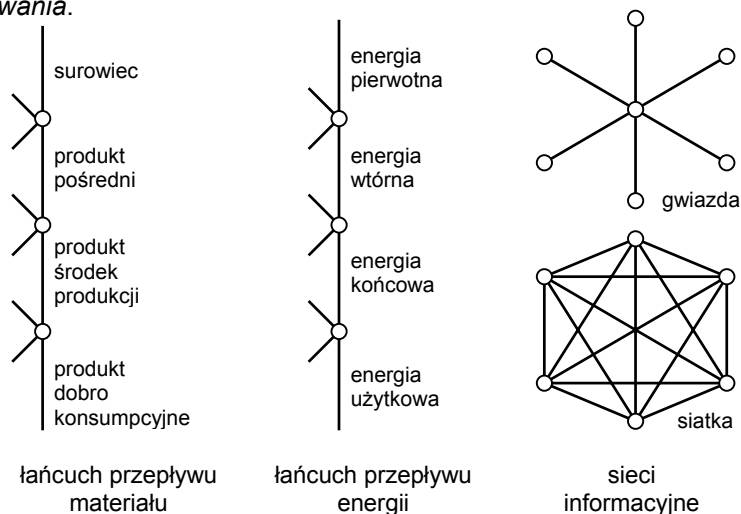
Oprócz struktur sprzężeniowych ważną rolę w systemach rzeczowych odgrywają również relacje przestrzenne i czasowe. Zbiór relacji czasowych nazywa się czasami strukturą procesu lub strukturą przebiegu (*Ablaufstruktur*), zbiór zaś relacji przestrzennych – strukturą kształtu (*Gebildestruktur*).

W systemie rzeczowym z wyższymi poziomami hierarchii, w kompleksie urządzeń lub sieci, występują sprzężenia bardziej złożone (rys. 25).

Klasyfikacja

Rysunek 26 pokazuje dwuwymiarową klasyfikację techniki rzeczowej. Każdy wiersz tego schematu odpowiada określonej kategorii wyjścia. Jeżeli wszystkim obszarom

techniki rzeczowej, zebranych w jednym wierszu, zechce się nadać ogólną nazwę, to automatycznie pojawiają się dwa pojęcia nadrzędne: technika energetyczna i technika informacyjna. Kategorii masa można przypisać nieużywane dotąd pojęcie techniki materiałowej. Każda kolumna schematu ujmuje wszystkie te systemy rzeczowe, które należy przypisać rozpatrywanej klasie funkcji. Można w tym celu wykorzystać nadrzędne pojęcia: *technika produkcji*, *technika transportu* i *technika magazynowania*.



Rys. 25. Formy struktury większych instalacji techniki rzeczowej

funkcja wyjście	PRZETWARZANIE (technika produkcji)	TRANSPORT (technika transportu)	GROMADZENIE (technika gromadzenia)
MASA (technika materiałowa)	technika przetwarzania technika wytwarzania	technika transportu bliskiego technika pojazdów budownictwo głębokie	technika zbiorników technika magazynowa budownictwo wysokie
ENERGIA (technika energetyczna)	technika przetwarzania energii	technika przenoszenia energii	technika gromadzenia energii
INFORMACJA (technika informacyjna)	technika przetwarzania informacji technika pomiarów, sterowania i regulacji	technika przenoszenia informacji	technika magazynowania informacji

Rys. 26. Klasyfikacja systemów rzeczowych

Systemy socjotechniczne

ROPOHL wychodzi od hipotezy, że na współdziałanie człowieka i techniki należy patrzeć z punktu widzenia zasad podziału pracy. Pojęcie pracy jest dla niego warunkiem myślenia o społeczeństwie.

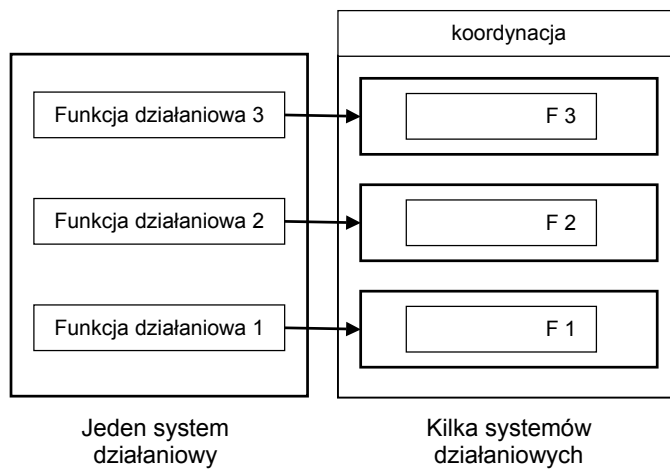
W celu przedstawienia wzajemnych powiązań i zależności między techniką rzeczową a społeczeństwem ROPOHL rekonstruuje teoriospołeczną koncepcję podziału pracy w języku teorii systemów. Jeżeli łączy się wzajemnie kilka systemów działaniowych, to można wtedy rozłożyć funkcje działaniowe (lub funkcje pracowe) na funkcje cząstkowe i przenieść każdą funkcję cząstkową do określonego systemu działaniowego, który się wtedy w niej specjalizuje. Jeżeli następnie stworzy się system rzeczowy o funkcji równoważnej z cząstkową funkcją działaniową, to taki system rzeczowy może ją zastąpić w sensie socjotechnicznego podziału pracy. Społeczny podział pracy przechodzi wtedy w socjotechniczny podział pracy; system działaniowy staje się systemem socjotechnicznym. Ponieważ technizacja zakłada społeczny podział pracy, w systemie socjotechnicznym uwidacznia się społeczny charakter techniki. Podział pracy można jednak stosować dopiero powyżej mikropoziomu personalnego. Jest to proces przebiegający od wyższych do niższych społecznych poziomów hierarchii. Potrzebna jest do tego koordynacja powiązań pracy, co w efekcie prowadzi do integracji społecznej. Jest ona inicjowana przede wszystkim instytucjonalną siłą działania systemów rzeczowych. Integracyjna rola systemów rzeczowych w systemach socjotechnicznych wskazuje na techniczny charakter społeczeństwa.

Społeczny podział pracy

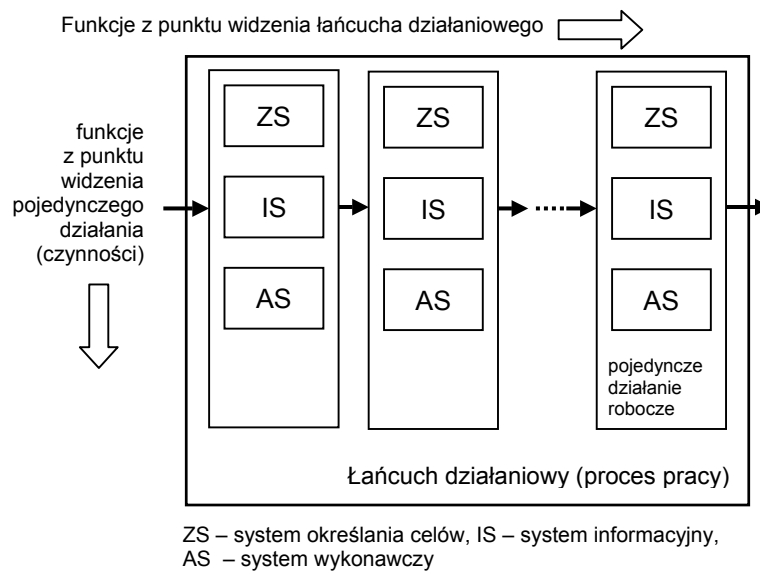
Istota podziału pracy polega na rozkładaniu i koordynowaniu działań. Chodzi o to, aby funkcje pracowe (działaniowe) – powiązane najpierw w jakimś wymyślonym lub rzeczywistym systemie działaniowym – rozłożyć w taki sposób, żeby każdą z nich (jako funkcję cząstkową) można było przekazać jakiemuś podsystemowi działaniowemu i następnie skoordynować je do jednej funkcji całkowitej (rys. 27).

Rozkład na funkcje z punktu widzenia organizacji pracy prowadzi do łańcucha pojedynczych działań (czynności) roboczych. Czynności te, wykonywane jedna po drugiej lub równocześnie, realizują całkowitą funkcję systemu działaniowego lub systemu pracy (rys. 28). Dodatkowo analizuje się pojedyncze działanie robocze wewnątrz łańcucha, rozróżniając między określaniem celów, informacją i wykonaniem, oraz funkcjami cząstkowymi w systemie informacyjnym i systemie wykonawczym.

Rozkład funkcjonalny w łańcuchu działaniowym jest odwzorowaniem klasycznego podziału – rozkładu pracy, rozkład zaś funkcjonalny pojedynczego działania wybiega w kierunku technologicznego podziału pracy (zasada podziału procesu przemysłowego na elementy konstytutywne, bez uwzględnienia ręki człowieka).



Rys. 27. Zasada podziału pracy

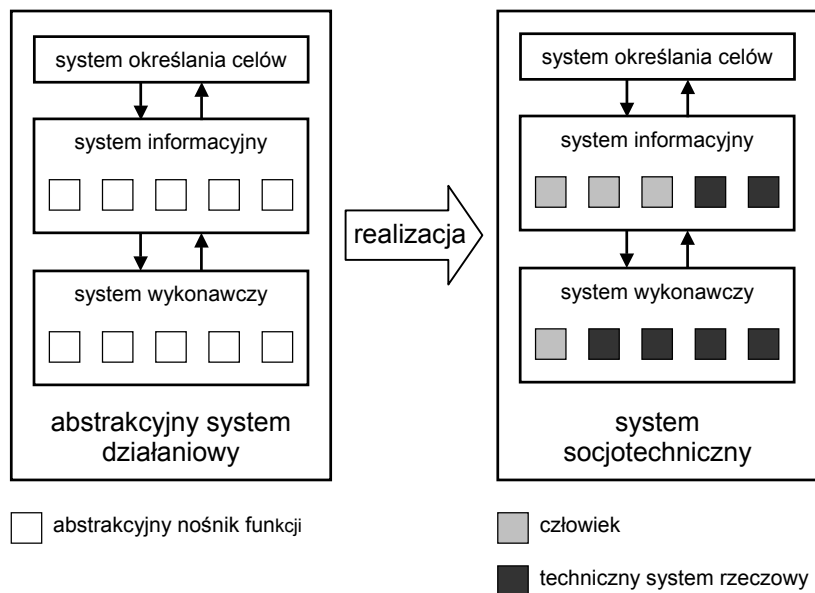


Rys. 28. Rozkład funkcjonalny dla łańcucha działaniowego i dla działania pojedynczego

Socjotechniczny podział pracy

Rysunek 29 konkretyzuje ogólną zasadę podziału pracy z rysunku 27 dla socjotechnicznego podziału pracy. W lewej połowie widzimy system działaniowy jako nośnik działania roboczego. Z antropologicznego punktu widzenia może być to konkretny człowiek, który wykonuje całą pracę. Z organizacyjnego punktu widzenia

blok ten jest abstrakcyjnym systemem działaniowym, który poddawany jest teoretycznej analizie zadania i rozkładowi na funkcje. Jeżeli chce się ten abstrakcyjny system działaniowy zrealizować empirycznie – albo chce się pracę, którą pierwotnie wykonywała pojedyncza osoba, rozdzielić na kilka nośników działaniowych –, to teoretycznie określone funkcje cząstkowe można w syntezie zadania przenieść na ludzkie systemy działaniowe lub na techniczne systemy rzeczowe. Zależnie od możliwości i potrzeb robi się jedno lub drugie. W ten sposób projektuje się system działaniowy, w którym wzajemnie współpracują ludzkie i techniczne nośniki funkcji. Taki system działaniowy, jak po prawej stronie rysunku 29, nazywa się systemem socjotechnicznym. System socjotechniczny jest więc systemem działaniowym (lub systemem pracowym), w którym podsystemy ludzkie i podsystemy rzeczowe tworzą integralną jednostkę.



Rys. 29. Socjotechniczny podział pracy

Podstawowym warunkiem socjotechnicznego podziału pracy jest zrównanie funkcji systemów rzeczowych z funkcjami cząstkowymi działania człowieka. Jeżeli to ma miejsce, to mamy do czynienia z *identyfikacją socjotechniczną*. Z historii i filozofii techniki wiemy, że identyfikacje socjotechniczne nastąpiły najpierw dla funkcji materiałowych, potem dla energetycznych i na koniec również dla informacyjnych. Rysunek 30 systematyzuje tę wiedzę korzystając z rozkładu funkcji na rysunku 19. W kolumnach schematu znajdują się najważniejsze funkcje cząstkowe systemu wykonawczego i informacyjnego, a w wierszach stoi zawsze „T”, gdy istnieje identyfikacja socjotechniczna. Innymi słowy, gdy odnośną funkcję działaniową w równoważny sposób można zastąpić systemem rzeczowym. Tak powstaje systematyka stopni technizacji.

W systemach socjotechnicznych podsystemy ludzkie i podsystemy techniki rzeczowej powiązane są zawsze w pewną integralną jednostkę działaniową. Jeżeli założymy, że określanie celów – pomimo całej komputerowo wspomaganą obróbkę informacji – zawsze w ostatniej instancji pozostaje funkcją ludzką, to systemy rzeczowe należy rozumieć tylko jako części systemów socjotechnicznych.

Schemat ten przedstawia nie tylko stopnie rosnącej (historycznie) technizacji, ale odzwierciedla równocześnie stopnie ubywania pracy. Można go więc wykorzystać dla systematyki kwalifikacji pracowniczych. Socjotechniczny podział pracy jest równoznaczny ze zmniejszeniem wkładu pracy ludzkiej. Technizacja nie jest więc tylko skutkiem, ale również przyczyną podziału pracy na nowe formy. Jeżeli na przykład przy zautomatyzowanej pracy maszynowej, z powodu trudności technicznych czy ekonomicznych, nie stechnizuje się funkcji pobierania, przenoszenia i przekazywania materiału, to w efekcie ludzkie działania robocze zredukuje się do pracy cząstkowej, dyktowanej przez rytm maszyny, skrajnie bezmyślnej i otępiającej. Jeszcze niedawno był to przypadek spotykany np. w fabrykach mebli, gdzie ludzie obsługujący zautomatyzowaną maszynę formatującą płyty wiórowe, przezrzucaли co dzień ręcznie dziesiątki ton płyt, a to dlatego, że nie zautomatyzowano (a czasem nawet nie zmechanizowano) funkcji dostarczania materiału do maszyny i odbioru z niej. Od rozwoju robotyki należy oczekiwać, że tego rodzaju luki w automatyzacji będą coraz radsze.

T = stechnizowana funkcja cząstkowa	WYKONANIE				INFORMACJA				OKREŚLANIE CELÓW
	oddziaływanie	przetwarzanie energii	kierowanie	manipulowanie	efektor	gromadzenie	receptor	przetwarzanie	
Cząstkowe funkcje pracy ⇒ Stopnie technizacji ↓									
Praca ręczna	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Praca rzemieślnicza	T	-	-	-	-	-	-	-	-
Praca zmechanizowana	T	T	-	-	-	-	-	-	-
Prosta praca maszynowa	T	T	T	-	-	-	-	-	-
Rozwinięta praca maszynowa	T	T	T	T	-	-	-	-	-
Rozwinięta praca maszynowa	T	T	T	T	T	-	-	-	-
Zautomatyzowana praca maszynowa	T	T	T	T	T	T	-	-	-
Zautomatyzowana praca maszynowa	T	T	T	T	T	T	T	-	-
Zautomatyzowana praca maszynowa	T	T	T	T	T	T	T	T	-

Rys. 30. Systematyka identyfikacji socjotechnicznych

Integracja społeczna

Jak integrują się systemy osobowe w społeczne mezo- i makrosystemy? Jak z różnych indywidualnych systemów określania celów tworzą się kolektywne systemy określania celów? Jak konstytuuje się system informacyjny na mezopoziomie czy makropoziomie z punktu widzenia licznych dysparytetów osobowych systemów informacyjnych? I jak kojarzą się indywidualne systemy wykonawcze w produkcję społeczną, opartą na podziale pracy. Jak w ogóle ująć stosunki społeczne jako zjawiska ponadindywidualne, mając na uwadze, że przecież to zawsze rzeczywisti ludzie w swoich rzeczywistych stosunkach życiowych są tymi, którzy stawiają cele, opanowują informacje i wykonują pracę.

Dla tak postawionego problemu integracji istnieją dwa rozwiązania, które jednak wydają się prowadzić na manowce. Rozwiązanie kolektywistyczne przypisuje zjawiskom społecznym charakter tajemniczej istotności, bez wyjaśniania w jaki sposób te całościowe jakości polegają na wkładzie rzeczywistych ludzi. Natomiast rozwiązanie indywidualistyczne rozumie zjawiska społeczne tylko jako połączony zbiór zjawisk indywidualnych i nie uwzględnia przez to emergentnych jakości społeczności. ROPOHL proponuje rozwiązanie jakie oferuje teoria systemów działaniowych. Objaśnia ona samodzielny charakter systemów społecznych ze zbioru relacji, które istnieją ponad zbiorem osobników i organizacji, nie pomijając przy tym wpływu pojedynczych osób i organizacji. W takiej koncepcji mogą mieć swoje teoretyczne miejsce również systemy rzeczowe. Pytanie o integrację społeczną staje się więc wtedy pytaniem o integrację socjotechniczną.

O ile socjotechniczny podział pracy ukazuje *społeczny charakter techniki*, o tyle integracja socjotechniczna ukazuje *techniczny charakter społeczeństwa*. Artefakty techniczne nie są incydentalnym dodatkiem do społeczeństwa, które w istocie opierałoby się na kulturze nietechnicznej; technika rzeczowa jest raczej istotnym rdzeniem postępującego uspołecznienia. Dialektycznie można powiedzieć: technika jest produktem społecznym. Technika jest obiektywną rzeczywistością. Społeczeństwo jest produktem technicznym.

Systemy celów

Pojęcie i struktura

Działanie, jako sposób zachowania się człowieka, odróżnia się od innych ludzkich zachowań przede wszystkim tym, że ukierunkowane jest na osiągnięcie określonych celów. Działanie techniczne ma na celu albo urzeczywistnienie systemów rzeczowych (działanie wytwórcze), albo służy najróżnorodniejszym innym celom, dla których realizacji używa systemów rzeczowych jako środków (działanie użytkowe). Dlatego ważne jest wyjaśnienie pojęcia celu i omówienie problemów, jakie wynikają ze stosunku celów i środków.

Cel jest dla ROPOHLA wyobraźalnym stanem rzeczy (*Sachverhalt*), do którego urzeczywistnienia się dąży. Stanami rzeczy są np. stany, przedmioty, działania, procesy, stosunki. Osiągnięcie stanu rzeczy istniejącego już w przyszłości jest

szczególnym przypadkiem tej definicji. Cel formułuje się w zdaniu celowym składającym się z dwóch części: (a) opisowej charakterystyki stanu rzeczy, (b) wyróżnienia tego stanu jako pożądanego, wymaganego, zażyczonego, popieranego. Często wystarcza już scharakteryzowanie samego stanu rzeczy, bo charakter celu jest jednoznacznie widoczny z powiązań.

Ponad te definicje można wyjść wtedy, gdy pojęcie celu uczyni się nadrzędnym dla każdego finalnego wyrażenia normatywnie wyróżniającego możliwe stany rzeczy lub klasy stanów rzeczy, bez względu na ich treść, formę, pochodzenie, obszar obowiązywania czy istnienia. Chodzi tu szczególnie o to, co nazywamy potrzebami, życzeniami, przeznaczeniem, interesem, normami czy wartościami. Przez „potrzeby” i „życzenia” podkreśla się przede wszystkim subiektywny charakter ustalania celu; o przeznaczeniu mówi się zwykle wtedy, gdy cel ma być osiągnięty za pomocą określonego środka; „interesami” określa się utrwalone cele grup społecznych; „normy” wskazują wyraźnie na społeczne pochodzenie, obowiązywanie i kontrolę określonych celów; „wartości” zaś oznaczają bardzo ogólne i zasadnicze zespoły celów, co do których istnieje roszczenie, by obowiązywały powszechnie. Wydaje się jednak, że istnieje potrzeba w pewnym sensie neutralnego, nadrzędnego pojęcia dla wszystkich tych finalnych wyrażań i nawet „wartości” można przekonująco wyrazić za pomocą ogólnego pojęcia celu.

System działaniowy z reguły nie ma tylko jednego, jedyne celu. Ma ich wiele i między nimi są zwykle pewne zależności. Jest to wystarczający powód, żeby do zbioru celów także zastosować ogólny model systemowy. *System celowy* jest wtedy zbiorem relacji między tymi celami. Podczas gdy systemami działaniowymi i systemami rzeczowymi modeluje się uchwytne zjawiska w rzeczywistości obiektywnej, systemami celowymi odwzorowuje się, w każdym razie w racjonalnej rekonstrukcji, językowo sformułowane wyobrażenia ludzi, organizacji czy społeczności. Dlatego systemy celowe nie są żadnymi aktywnymi bytami, które mogą mieć własne funkcje; są tylko abstrakcyjnymi systemami struktur. Często cele przyjmowane są milcząco w ustalającym je systemie działaniowym i co najwyżej antycypowane przez wytwory wyobraźni i znaki językowe.

Cele można konkretyzować różnie. I tak można bardzo ogólnie formułować cel „techniki dopasowanej do człowieka”; na poziomie średnim dążyć do „produktów przyjaznych dla użytkownika”, a w konkretnym przypadku zastosowania dążyć do celu, żeby podczas pracy zmywarki poziom hałasu w kuchni nie przekraczał 50 decybeli. W hierarchii pojęć najbardziej ogólne cele okazują się nadrzędnymi pojęciami dla celów konkretnych i dlatego można je nazywać celami wyższymi (nadcelami). W języku logiki ekstensjonalnej „produkty przyjazne dla użytkownika” obejmują abstrakcyjną klasę wszystkich produktów, których właściwości optymalnie są dostosowane do potrzeb i życzeń użytkownika. Oczywiście zmywarka cicha jest szczególną konkretyzacją jakiegoś celu nadrzędnego. Nie jest ona środkiem służącym do osiągnięcia tego celu nadrzędnego, lecz urzeczywistnia ten cel w samej sobie; ustalenie to jest ważne, gdy chcemy się precyzyjnie odgranicyć od później omawianej relacji instrumentalnej.

Różne poziomy abstrakcji celów można teoriosystemowo odwzorować w *hierarchii celów*. Cel jest więc traktowany jako podsystem celu nadrzędnego (nadcelu) i ze swej strony zawiera cele podrzędne jako pod-podsystemy. Najniższe rangą, najbardziej konkretne cele można, jak to zwykle w języku potocznym, nazwać *przeznaczeniami*, a najwyższe rangą, najbardziej ogólne cele powinny nazywać się *wartościami*. Również wartości są klasami abstrakcji możliwych pożądaných stanów rzeczy. W zasadzie każdy cel, z wyjątkiem całkowicie konkretnych przeznaczeń, można analizować jako system podcelów. Oczywiście w żadnym przypadku podcele nie dają się automatycznie wywieść z celu o wyższej randze; konkretyzacja celów jest, jak każda interpretacja systemu, procesem twórczym, w którym wytwarza się dodatkową informację. I odwrotnie, nie można każdego systemu celów jednoznacznie przyporządkować jednemu jedynemu nadcelowi; jest bardzo wątpliwe czy spójna hierarchizacja, od konkretnych przeznaczeń aż do ogólnych wartości jest możliwa czy sensowna. Teoriosystemowa koncepcja hierarchii powinna służyć jedynie jako narzędzie umysłowe.

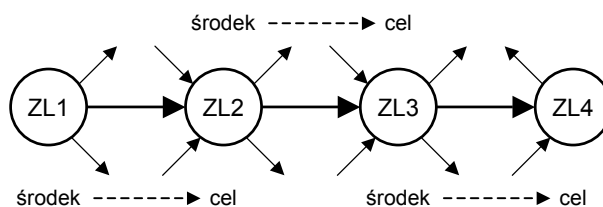
Na każdym poziomie hierarchii system celowy jest uporządkowanym zbiorem celów. Porządek strukturalny ustala się przez różne typy relacji. Przynajmniej jeden ze zbiorów relacji musi być opisywalny, aby w ogóle można było mówić o systemie celowym. Najpierw istnieje *relacja indyferencyjna*, która podaje, że dwa cele są wzajemnie całkowicie niezależne; innymi słowy, każdy z tych celów można realizować bez uszczerbku dla realizacji drugiego celu. Odwrotnie jest podczas *relacji konkurencyjnej*, opisującej sytuację, kiedy to cele „nie znoszą się wzajemnie”. Wtedy dla realizacji jednego celu trzeba z konieczności poświęcić drugi. Gdy istnieje relacja konkurencyjna, ale również w innych przypadkach, w grę wchodzi *relacja preferencyjna*, dająca jednemu z celów pierwszeństwo w stosunku do drugiego.

Aby nie zagmatwać tego przeglądu, ograniczymy się do relacji dwuwymiarowych i przyjmiemy binarne wartości celowe, które mają tylko cechy: „spełniona” i „niespełniona”. W rzeczywistości wartości celowe leżą zwykle na skalach współrzędnych lub osiach liczbowych z licznymi stopniowaniami. Podczas relacji konkurencyjnej na przykład nie idzie o wszystko lub nic, lecz o wyrównoważenie ilościowe, w jakiej mierze należy zmniejszyć stopień spełnienia drugiego celu na korzyść pierwszego celu. Takie wyrównoważenia stają się tym trudniejsze, im więcej celów równocześnie bierze się pod uwagę. Metody formalne, jak analiza wartości użytkowej, pozwalające równocześnie ocenić różne opcje działania według wielu ważonych celów, mogą tego rodzaju problemy uczynić bardziej przejrzystymi, ale nie pozwalają ich rozwiązać jednoznacznie.

Szczególne znaczenie ma *relacja instrumentalna*, znana jako stosunek cel-środek. Polega ona na tym, że przez spełnienie jednego celu można również spełnić inny cel. Jeżeli chce się osiągnąć cel „cicha zmywarka”, to można wybrać między innymi środek, jakim jest wytworzenie obudowy maszyny z materiału izolującego dźwięki. Jeżeli w miejscu wytwarzania nie dysponuje się jednak materiałem dźwiękochłonnym, to staje się to ze swej strony celem, który można osiągnąć przez zastosowanie środka „pojazd transportowy”, który ten materiał dostarczy do oddalonego wytwórcy. Z drugiej strony jednak można również cichą zmywarkę znowu

przedstawić jako środek, za którego pomocą chciałoby się osiągnąć inny cel, na przykład oszczędność kosztów przez pracę w nocy (tani prąd), co przy głośnej maszynie nie byłoby wskazane ze względu na sąsiadów.

Relacja instrumentalna daje się w zasadzie powtarzać dowolnie często. Powstaje w ten sposób łańcuch celów (rys. 31). Ten sam element w łańcuchu celów może być rozumiany zarówno jako cel jak i jako środek, w zależności od tego, czy ujmuje relację instrumentalną jako człon poprzedzający czy jako człon następujący. Taki prosty łańcuch celów jest jednak przypadkiem wyidealizowanym; w rzeczywistości relacje instrumentalne w systemie celowym często tworzą usieciowane struktury oczkowe. Na rysunku 32 pokazują to dodatkowe strzałki, które w elementach zbiegają (konwergują) lub rozbiegają się (dywergują).



Rys. 31. Łańcuch celów

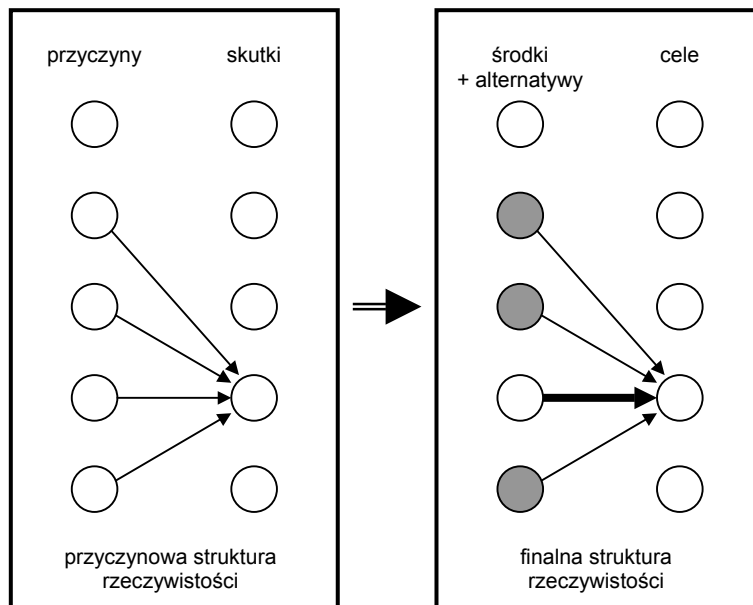
Problem cel-środek

Podobnie jak niektóre inne problemy filozoficzne, problem cel-środek wynika w dużej części z wieloznaczności języka ogólnego i z jego ontologicznej interpretacji. Za różnymi nazwami kryją się w zasadzie różnorodne zjawiska. Język rozróżnia „cel” i „środek”. Środek kojarzy się ze sferą tego, co jest dane obiektywnie i neutralnie; natomiast cele kojarzą się ze sferą tego, o czym myśli się subiektywnie i co się wartościuje. Ten dualizm środków i celów zakłada, że można precyzyjnie rozdzielić „to, co jest” od „tego, co powinno być” i „móc” od „chcieć”. To, co dla poznania teoretycznego jest sensowną zasadą metodologiczną, przenosi się nieoczekiwanie na teorię praktycznego działania. Wtedy jednak rozdział środków i celów, z czego się oczywiście wychodzi, ocenia się różnorodnie. Z pozycji afirmatywnej rozdział ten wydaje się dobry i poprawny; z pozycji krytycznej zarzuca mu się poważne wady, nie kwestionując jego istnienia.

Pozycja afirmatywna chce gospodarkę i technikę przyporządkować obszarowi środków obiektywnych i na tej podstawie uciec od każdej ocenowej dyskusji o celach i od rozważań politycznych. Podejście takie ciągle jeszcze preferują przemysłowcy i inżynierowie. Według nich technika ogranicza się tylko do dostarczania środków neutralnych co do wartości. Środków tych można użyć zarówno w dobrym jak i złym celu i nie mają one do czynienia z celami realizowanymi podczas użytkowania środków technicznych. Natomiast pozycja krytyczna kwestionuje podejście, w którym eksperci koncentrują się na środkach i zaniedbują problem czy cele jako takie są rozsądne. Widzi ona w tym przewagę tak zwanego rozumu instrumentalnego. Rozum instrumentalny, ponad „technicznymi” problemami opanowa-

nia środków, zaniedbuje „praktyczne” porozumienie ponad normami i wartościami oraz „emancypacyjną” refleksję nad zmiennymi stosunkami zależności i przez to popada w ograniczoność „techniczną”.

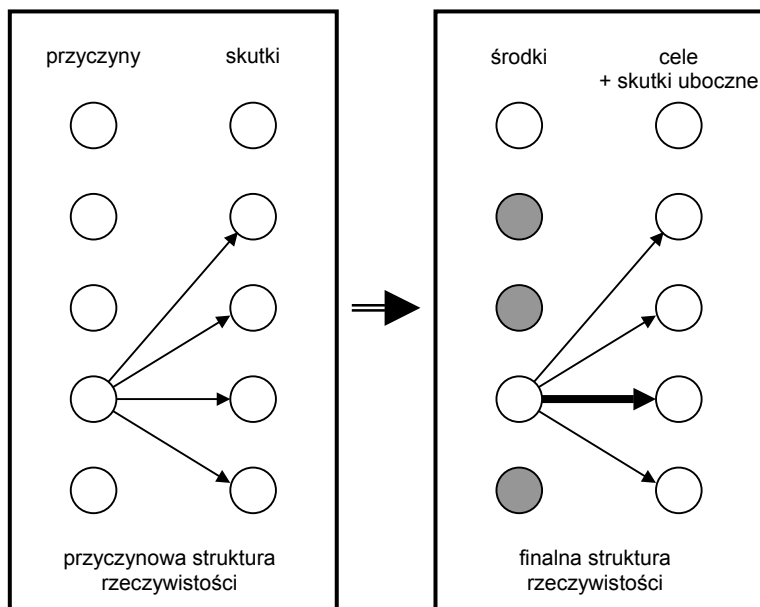
W istocie relacja instrumentalna opiera się na stosunku przyczynowym. Pewien bałagan w dyskusji o celach-środkach można usunąć przez analizę odpowiedniości struktury przyczynowej i struktury finalnej (rys. 32 i 33). Po lewej stronie tych rysunków widać model prostej struktury przyczynowej, który jest zmagazynowany opisowo w systemie informacyjnym systemu działaniowego. Model ten identyfikuje określone zjawiska (jako przyczyny), które powodują określone inne zjawiska (jako skutki). W tym modelu opisowym stosuje się znane metody uzasadniania.



Rys. 32. Równoważność środków (przy relacjach konwergencyjnych)

Jeżeli ten sam cel można osiągnąć kilkoma środkami (rys. 32), to bada się z reguły mniej lub bardziej równoważne opcje wynikające z analizy struktury przyczynowej. Podczas wyboru ważną rolę odgrywa wtedy przydatność do osiągnięcia określonego celu, ale nie jest ona jedynym kryterium oceny. Jeżeli uwzględnia się mianowicie wielowartościowość każdego środka (rys. 33), to trzeba również rozważyć, który z przydatnych środków niesie z sobą najmniej negatywnych i najwięcej pozytywnych skutków ubocznych; można to nazwać „wartością własną” tego środka. Innymi słowy trzeba całą strukturę przyczynową przeprowadzić w strukturę końcową systemu ustalania celów i zamodelować wszystkie możliwe przyczyny i skutki struktury przyczynowej w postaci złożonego systemu celowego. „Dany” jest bowiem z reguły nie tylko *jeden* cel, lecz mniej lub więcej *explicite* system celów,

a „wartość własna” objawia się wtedy zwykle przydatnością z punktu widzenia celu drugiego czy trzeciego.



Rys. 33. Wielowartościowość środków (przy relacjach dywergencyjnych)

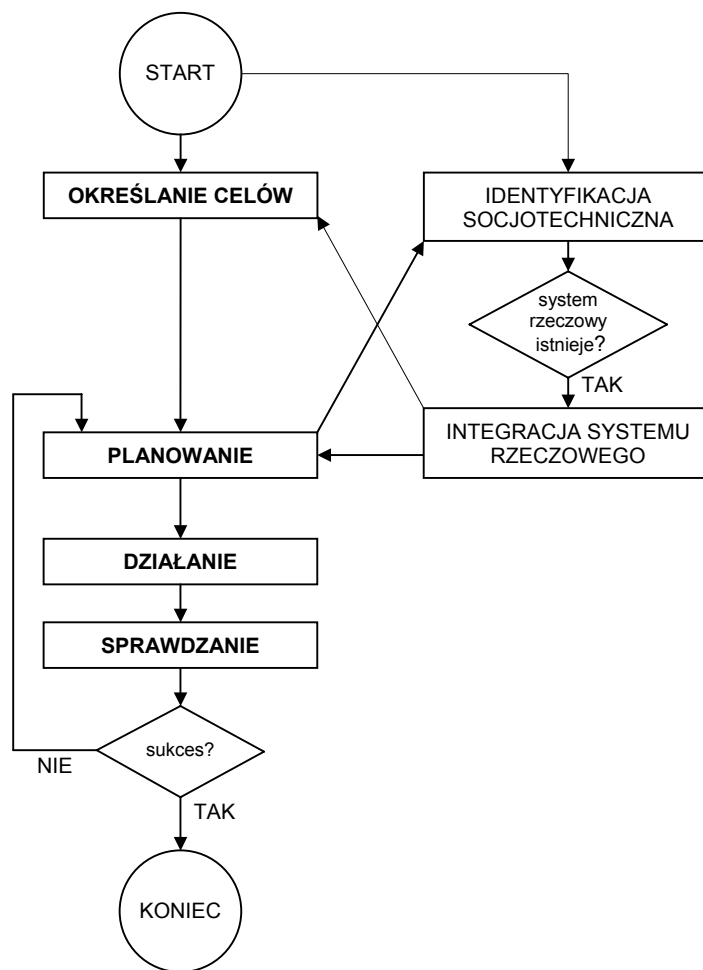
Przedstawione zróżnicowanie i relatywizację schematu cel-środek można uzasadnić następująco. Jeżeli weźmie się pod uwagę wzajemne oddziaływania „środków” i „celów” oraz ich ciągłą zmianę ról wewnątrz łańcucha celów, to należy zrezygnować z ontologicznego znaczenia tych pojęć i stosować je tylko w dobrze zdefiniowanym sensie pragmatycznym. Technika jest systemem środków. Techniczny system rzeczowy w kontekście użytkowania powinien być rozumiany raczej jako system środków, natomiast w kontekście powstawania jest on celem działania technicznego. W zasadzie to ludzie przecież stawiają cele, ale to są niekoniecznie ci ludzie, którzy systemy rzeczowe użytkują. Wszyscy są użytkownikami maszyn. Z socjotechnicznego podziału pracy wyrastają problemy technizacji, wymagające starannej analizy. Analizy tej nie można zastąpić przez przypisywanie środkom technicznym jakichś „własnych praw”. Jeżeli coś się usamodzielniało w nowoczesnym społeczeństwie, to nie środki techniczne, lecz cele ekonomiczne.

Użytkowanie systemów rzeczowych

Struktura przebiegu użytkowania

System socjotechniczny nie jest dany raz na zawsze, lecz trzeba go dopiero stworzyć w celu użytkowania systemu rzeczowego. Socjotechniczne tworzenie systemu

odbywa się według typowych wzorców, które można nazwać strukturą przebiegu. Można tu wykorzystać podstawową strukturę obwodu działaniowego z rysunku 5 i rozszerzyć ją dla użytkownika rzeczy.



Rys. 34. Struktura przebiegu użytkowania rzeczy

Na pierwszy rzut oka na rysunku 34 widać strukturę prostego obwodu działaniowego i zauważa się jedynie dodatkową pętlę, która uzupełnia funkcję cząstkową planowania o dwie dalsze funkcje cząstkowe. Tu właśnie zachodzą te procesy, które z systemu ludzkiego czynią system socjotechniczny. Podczas planowania systemu działaniowego, odkrywa się, że planowana funkcja działaniowa może być przejęta częściowo lub całkowicie przez system rzeczowy; jest to *identyfikacja socjotechniczna*. Jeżeli takim systemem rzeczowym dysponujemy, to system działaniowy wchodzi z nim w połączenie. W ten sposób powstaje nowego rodzaju jedno-

stka działaniowa, w której współdziała system ludzki z systemem technicznym. Jest to *integracja socjotechniczna*: z pierwotnie ludzkiego systemu działaniowego powstaje socjotechniczny system działaniowy, który teraz, jako całość, realizuje funkcję działaniową lub funkcję pracy.

Przedstawiony wzorzec przebiegu zaczyna się, jak każde działanie idealne, od określenia celów, które można byłoby realizować w ogóle lub łatwiej przez użycie systemu rzeczowego. Ponieważ zaczyna się od celów, takie działanie użytkownika można nazwać działaniem *zdominowanym przez cele*; odpowiadają mu grubsze strzałki na rysunku 34. Istnieje jednak również wariant użycia rzeczy *zdominowany przez środki* (cienkie strzałki na rys. 34). Wtedy przebieg użytkownika rozpoczyna się nie od określenia celów, lecz od identyfikacji socjotechnicznej, a więc od sprostowania systemu rzeczowego, który mógłby przejąć określone funkcje działaniowe. To, co w wariantcie zdominowanym przez cele jako „pętla” podporządkowane było planowaniu działania, staje się teraz punktem wyjścia do działania użytkownika. System działaniowy poznaje najpierw nowy system rzeczowy, antycypuje otwarte przez to możliwości działania, integruje system rzeczowy, jak dalece jest to możliwe metodą prób i wypróbówuje go jakby zabawowo. Przez to odkrywa nowe możliwości i objaśnia je w końcu jako nowe cele.

Użytkowanie rzeczy może przebiegać według wariantu zdominowanego przez cele lub zdominowanego przez środki. Możliwe są również formy mieszane. Do odpowiedzi na pytanie, kiedy i pod jakimi warunkami panuje pierwszy lub drugi wariant, trzeba uwzględnić trzystopniową hierarchię ludzkich systemów działaniowych (rys.20): systemy osobowe, mezosystemy społeczne i makrosystemy społeczne.

Gdy systemy osobowe używają systemów rzeczowych, to pojedyncze osoby tworzą razem z artefaktem jednostkę działaniową. Może w ten sposób powstawać wrażenie, że użytkowanie rzeczy na tym poziomie jest sprawą całkowicie prywatną, osobistą i indywidualną. Byłoby to słuszne dla sytuacji, w której użytkownik rzeczy byłby równocześnie jej twórcą i jedynym użytkownikiem. Tak jednak nie jest, ponieważ w nowoczesnym społeczeństwie przemysłowym wytwarzanie rzeczy i ich użytkowanie jest rozdzielone podziałem pracy. Wytwórców jest coraz mniej, użytkowników zaś coraz więcej (na ogół wszyscy jesteśmy użytkownikami rzeczy). Tak więc początek systemu rzeczowego, używanego przez jedną osobę, sprowadza się przynajmniej do jednej innej osoby, zwykle jednak do złożonego splotu organizacji przemysłowych. Stąd wynika centralne twierdzenie РОПОНЛА: *Gdy osoba w swoje działanie włącza system rzeczowy, to wchodzi w relację społeczną*. Dlatego już indywidualne użytkowanie rzeczy tworzy system socjotechniczny.

Na poziomie mezosystemu wygląda to nieco inaczej. Wiemy, że mezosystem socjotechniczny, na przykład system produkcji, składa się ze wzajemnie powiązanych mikrosystemów, nazywanych również systemami pracy (systemami pracowymi). Każdy system pracowy obejmuje jeden podsystem ludzki i jeden podsystem techniki rzeczowej i przyczynia się częściowo do funkcji produkcyjnej. Użytkowanie rzeczy w systemie pracowym jest klasycznym tematem nauki o pracy. Jeżeli nauka o pracy uwzględnia aspekty socjopsychologiczne, to zawsze widzi, że taki system

pracowy nie powstaje z celów określonych przez pracowników, lecz z celów organizacji. To, jaki pracownik zostanie postawiony przy jakiej maszynie i jakie działania robocze zostanie całkowicie technizowane, jest procesem określanym z reguły przez nadrzędną politykę przedsiębiorstwa, bez możliwości wpływu pracownika. Indywidualne użytkowanie rzeczy nie jest wtedy zdominowane przez cele, a przez środki pracy zdominowane jest tylko w takim stopniu, w jakim są one dane pracownikowi przez organizację. Tak więc pierwszy etap analizy przebiegu użytkowania pokazuje, że w przedsiębiorstwie przemysłowym indywidualne użytkowanie rzeczy przechodzi w korporacyjne użytkowanie rzeczy; przez to potwierdza się nieredukcjonistyczny model hierarchii.

W mezosystemach socjotechnicznych przeważa oczywiście użytkowanie rzeczy zdominowane przez cel. Cele produkcji, jakie realizuje zakład przemysłowy, wyprzedzają z reguły planowanie produkcji, w którym dopiero następnie identyfikuje się właściwe środki produkcji. Zorientowana na cel forma użytkowania występuje tym wcześniej, im system działaniowy jest bardziej podatny na planowanie. W zakładzie przemysłowym są w tym celu własne oddziały ze specyficznymi wykwalifikowanymi pracownikami, którzy podczas planowania produkcji sprawdzają przydatność istniejących maszyn uniwersalnych, wyszukują na rynku maszynowym odpowiednie maszyny specjalistyczne czy nawet – po zidentyfikowaniu technizowalnych funkcji pracy – przechodzą do trzeciego wariantu użytkowego: własnego wytworzenia odpowiednich systemów rzeczowych.

Przy rozpowszechnionej dominacji celów zdarzają się również formy użytkowania orientowane na środki. I tak zakupienie wyposażenia komputerowego często wynika z idei, że firma powinna być wyposażona w nowoczesne środki techniczne; sensowne użytkowanie przychodzi później. Takie postępowanie wywodzi się oczywiście z tego, że organizacja produkcji orientuje się tylko według rzeczowych (przedmiotowych) celów produkcji.

Makrosystem socjotechniczny dotyczy głównie państwowej organizacji społeczeństwa technizowanego. Państwo jako użytkownik techniki występuje przede wszystkim z systemami rzeczowymi na wyższych stopniach hierarchii systemów rzeczowych: duże systemy techniczne jak infrastruktura energetyczna, transportowa, informacyjna, internet.

Identyfikacja socjotechniczna

Identyfikacja funkcji systemu rzeczowego następuje podczas planowania działania. Późniejsze działanie rzeczywiste rozkłada się na funkcje cząstkowe, antycypując je informacyjnie. Podczas użytkowania zdominowanego przez cele ciąg funkcji cząstkowych jest zwykle już mniej lub bardziej jawnie ustalony, gdy dla określonych funkcji cząstkowych może być zidentyfikowany system rzeczowy. Natomiast podczas użytkowania zorientowanego na środki nie tylko całkowita funkcja, ale również jej specyficzne zestawienie z funkcji cząstkowych wynikają z już zidentyfikowanych funkcji systemu rzeczowego.

Zanim funkcja systemu rzeczowego zostanie zidentyfikowana jako ważna dla działania i zostanie zintegrowana w konkretne działanie, występuje tylko jako *funkcja*

potencjalna. Dopiero gdy funkcja potencjalna zostanie zastosowana w systemie socjotechnicznym urzeczywistnia się jako *funkcja realna*.

Identyfikacja nie sprawia problemu, gdy system rzeczowy ma tylko jedną funkcję – jest *jednofunkcyjny*. Systemy rzeczowe charakteryzują się jednak zwykle licznymi atrybutami, między którymi może istnieć wiele różnych funkcji. To *wielofunkcyjność* systemów rzeczowych powoduje, że proces identyfikacji określonej funkcji jest dla użytkownika aktem twórczym.

Bardzo proste funkcje systemowe, spotykane przy takich elementach rzeczowych jak narzędzia, są tak elementarne i niespecyficzne, że same z siebie nie charakteryzują żadnego określonego działania. Mechaniczna funkcja noża – krajanie – nie mówi o tym, czy chodzi o krajanie chleba czy krajanie ciała. Wielofunkcyjność takich systemów rzeczowych, zastosowanych normatywnie, ujawnia się jako wielowartościowość i nie tylko umożliwia użytek dobry, ale również zły – nadużycie.

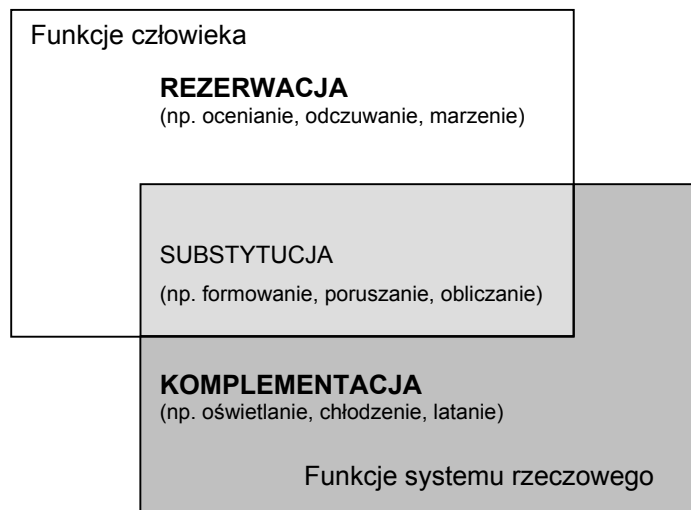
Sz szczególnie wysoką wielofunkcyjność wykazują systemy techniki informatycznej. Powodem jest połączenie prostoty i złożoności. Elementarne funkcje przetwarzania sygnału są bardzo proste. Dopiero przez zwielokrotnienie prostych układów, ich integrację, powiązanie oraz interpretację za pomocą oprogramowania, funkcje podstawowe łączy się w najróżniejsze procesy informacyjne, które następnie symulują bardzo różnorodne procesy rzeczywiste.

Integracja socjotechniczna i zasady technizacji

Integracja socjotechniczna może przybierać dwie różne formy: substytucję i komplementację. Rysunek 35 pokazuje dwa zbiory funkcji działaniowych: (1) zbiór ludzkich funkcji działaniowych i (2) zbiór funkcji działaniowych realizowalnych technicznie. W środku rysunku prostokąty pokrywają się częściowo, tworząc wspólną część obu zbiorów, w której funkcje człowieka można również przedstawić w postaci technicznej (funkcji dotyczących rzeczy). Tę wspólną część РОПОНН nazywa *substytucją*. Substytucja funkcji ludzkich przez funkcje urządzeń technicznych jest zasadą technizacji. Zasada ta panuje w dotychczasowym objaśnianiu techniki a w ekonomii rozumiana jest jako substytucja pracy przez kapitał rzeczowy.

W użytkowaniu urządzeń technicznych zasada substytucji odgrywa znaczącą rolę. Silniki zastępują siłę mięśni, prowadnice w maszynach zastępują sensomotoryczną koordynację ruchów ręki, maszyny liczące zastępują proste wysiłki inteligencji. Swój punkt szczytowy zasada substytucji osiąga w *automatyzacji*, najbardziej zaawansowanym poziomie technizacji.

Zasada substytucji daje się opisać w następujący sposób: plan działania ludzkiego systemu działań zawiera funkcję częściową, która może być wykonana przez poszczególne osoby lub grupę ludzi. Jeżeli następnie zidentyfikuje się system rzeczowy, którego funkcja jest równoważna z systemem działaniowym, to powstanie system socjotechniczny. W systemie socjotechnicznym rozpatrywana funkcja częściowa przemieszczana jest więc z ludzkich nośników funkcji do technicznych nośników funkcji. Wraz z tym następuje substytucyjna integracja. Określone podsystemy systemu działań nie są już dalej organami człowieka czy bytami społecznymi, lecz wytworami techniki.



Rys. 35. Zasady technizacji

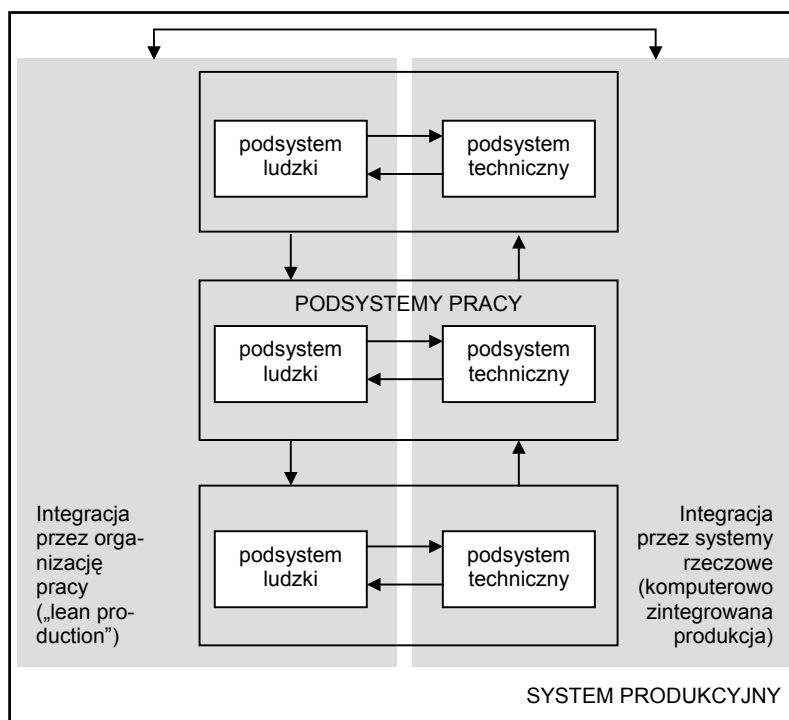
Podczas takiej integracji wytwarzane są relacje socjotechniczne, a więc powiązania między ludzkimi i technicznymi nośnikami funkcji. Funkcja całkowita zostaje zachowana, ale struktura systemu działań przyjmuje nową jakość. W takim opisie przydatność ujęcia systemowego dla zrozumienia techniki jest szczególnie widoczna: Ponieważ jeden i ten sam model umożliwia ujęcie zarówno systemów społecznych jak i technicznych, może także odwzorować integrację tych różnych typów systemów i przez to pozwolić uchwycić tę szczególną jakość systemów socjotechnicznych, która mogłaby ująć uwadze wyizolowanemu spojrzeniu nauk społecznych czy wyizolowanemu spojrzeniu nauk technicznych.

Zupełnie inaczej ma się sprawa, gdy urządzenie techniczne (system rzeczowy) integrowane jest według zasady *komplementacji*. Wówczas urządzenie techniczne, z którym ludzki system działaniowy się łączy, wykonuje zadanie (funkcję) niemożliwe do wykonania przez człowieka. Kto zamierza czytać książkę w nocy, to może tego dokonać wtedy, gdy zaopatrzy się w techniczny środek oświetlenia. W komplementacji mamy do czynienia z funkcją techniczną, której w ludzkim systemie działań nie odpowiada nic porównywalnego. Urządzenia oświetlające, chłodzarki, samoloty, telewizory i wiele innych spełniają funkcje, które nie mogłyby być realizowane inaczej niż za pomocą funkcji techniki rzeczowej.

Obie zasady integracji należy rozumieć oczywiście jako typy idealne, które nie zawsze występują w czystej formie. Przede wszystkim czysta substytucja występuje bardzo rzadko; przykładem może być technika medyczna, gdzie środki wspomagające widzenie czy słyszenie zastępują utracone zdolności ludzkie czy nawet przyjmują postać sztucznych organów w miejsce naturalnych nośników funkcji. Istnieją jednak ludzkie funkcje działaniowe, które w zasadzie nie powinny być technizowane. Wydaje się to oczywiste, choć pewni propagandziści tak zwanej

sztucznej inteligencji wcale tak nie uważają. Dla tych funkcji ROPOHL wprowadza pojęcie *rezerwacji*, wierząc że czynności naszej świadomości – jak ocenianie, odczuwanie czy marzenie – rzeczywiście pozostaną zarezerwowane dla człowieka.

Zasady integracji socjotechnicznej występują na wszystkich trzech stopniach hierarchii. Przyjmują jednak całkowicie różne cechy. W *mikrosystemach* indywidualnego działania substytucja dotyczy bezpośrednio funkcji pracy poszczególnych ludzi, zarówno w obszarze prywatnym jak i zawodowym. Na *mezopoziomie* organizacji przemysłowych zasady integracji odnoszą się w pierwszej linii do funkcji organizacyjnych. Ponieważ identyfikacja socjotechniczna nie dotyczy tu indywidualnych funkcji pracowych, lecz bezpośrednio funkcji organizacyjnych, formy integracji przyjmują inną jakość. Daleko posunięty rozkład pracy ułatwia substytucję organizacyjną. Jeżeli siły robocze są już tak wyspecjalizowane, że wykonują tylko wąsko opisane funkcje cząstkowe, to dalsza technizacja prowadzi do substytucji całkowitej. Tu leży teoretyczne jądro zjawiska uwolnienia, polegające na zastąpieniu całego człowieka systemem rzeczowym. Ponieważ warunkiem tego uwolnienia jest rozkład funkcjonalny poszczególnych działań, może ono występować dopiero na mezopoziomie. W pełni substytuować można tylko człowieka, który jest zredukowany do podfunkcji systemu informacyjnego i systemu wykonawczego i wykluczony z funkcji określania celów.



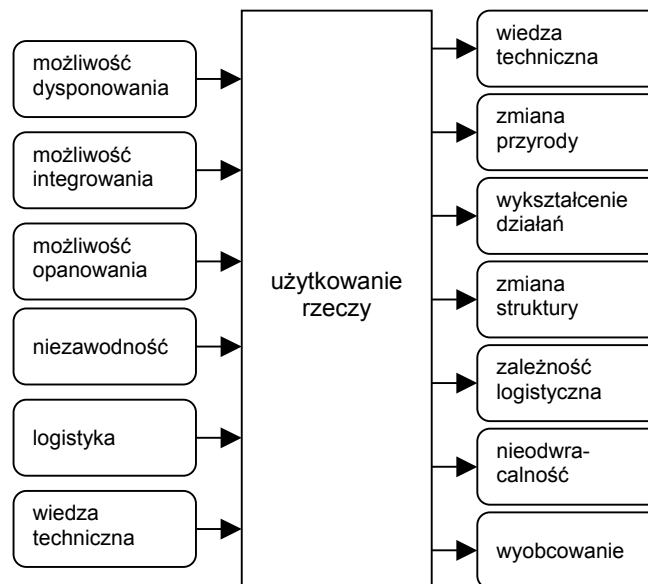
Rys. 36. Integracja socjotechnicznych systemów pracy

Właśnie dla mezosystemów socjotechnicznych typu przedsiębiorstwa produkcyjnego charakterystyczny jest przebieg technizacji, który obejmuje najpierw system wykonawczy – mechanizację i automatyzację wytwarzania rzeczy – i obecnie z elektronicznymi urządzeniami komputerowymi, ze zautomatyzowaną obróbką tekstu, z komputerowo wspomaganym projektowaniem itp. coraz bardziej wkracza w zarządzania systemem informacyjnym. W toku procesu technizacji zastępuje się już nie poszczególnych ludzi, ale często całe zespoły robocze i oddziały. Wystarczy pomyśleć o funkcji obliczania wynagrodzenia, którą dziś identyfikuje się bezpośrednio z funkcją komputera.

Również koordynacja funkcji rozłożonych z punktu widzenia podziału pracy może być substytuowana przez systemy rzeczowe. Koncepcja komputerowo zintegrowanej produkcji (CIM), pokazana na rysunku 36, objęła nawet całkowitą technizację funkcji koordynacyjnych. Wprawdzie ta centrowana na technikę koncepcja została tymczasem zrelatywizowana przez nowe modele organizacyjne, zorientowane na pracę, jednak nic nie zmienia w fakcie, że, jak to pokazuje rysunek 36, integracja socjotechniczna dokonuje się nie na mikropoziomie systemu pracy, lecz przede wszystkim na mezopoziomie systemu produkcji.

Warunki i skutki

Działaniom użytkownika muszą odpowiadać pewne warunki; można też zidentyfikować różne rodzaje specyficznych skutków; wiedza techniczna okazuje się być przy tym w takim samym stopniu warunkiem jak i skutkiem (porównaj rys. 37). Na koniec użytkowanie rzeczy, jak wszystkie działania, staje się kierowane przez określone cele. Obok celów pierwotnych, na które bezpośrednio orientują się każdorazowe funkcje rzeczowe, należy rozpoznać cele wtórne, wśród których zasada racjonalności ogrywa rolę olbrzymią, aczkolwiek nie jedyną.



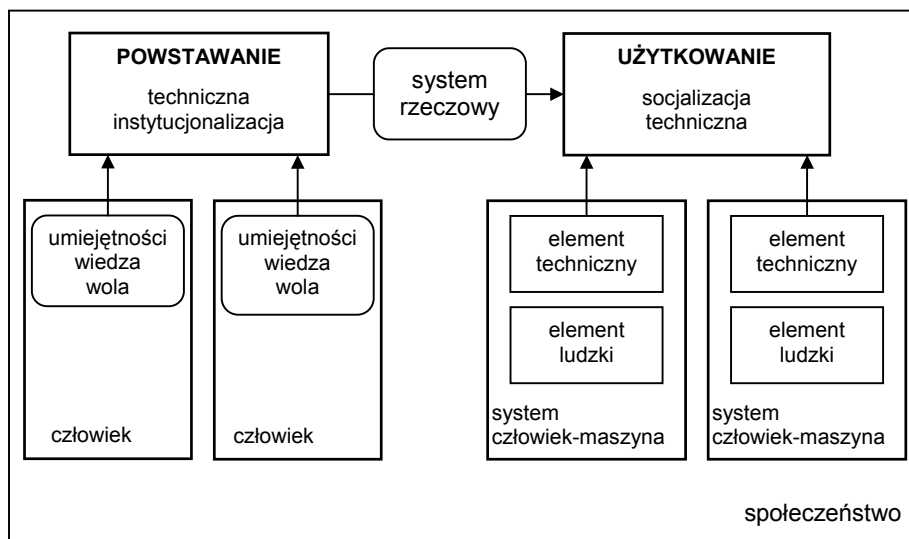
Rys. 37. Warunki i skutki użytkowania rzeczy

Ogólne kategorie użytkowania rzeczy mogą różnie się wyrażać na poszczególnych poziomach hierarchii. I tak indywidualne użytkowanie techniki podlega w większości przypadków strukturze przebiegu zdominowanej przez środki. Zamiast tego, że jednostka autonomicznie stawia sobie cel działania, dla którego spełnienia następnie szuka odpowiedniego systemu rzeczowego i znajduje go, jest jej z reguły najpierw polecany system rzeczowy jako „kombinacja cel-środek”. System rzeczowy nasuwa użytkownikowi od samego początku cel działania, jaki już wytwórca przyjął sobie wraz z koncepcją produkcji. Natomiast na mezopoziomie i makropoziomie przeważa struktura przebiegu zdominowana przez cel. Również w przypadku osób indywidualnych zasada racjonalności, według której korzyści i nakłady użytkowania rzeczy trzeźwo są wyważane, jest mniej wykształcona niż w organizacja gospodarczych mezopoziomu, gdzie nierzadko skazuje ona na drugie miejsce nawet cele pierwotne produkcji zgodnej z potrzebami.

Jeżeli systemy rzeczowe standardyzowane są jako produkty masowe, to wymagają nie tylko od poszczególnych użytkowników określonego wysiłku dopasowującego, ale również typizują działanie kolektywne. Wszyscy, którzy używają tego samego systemu rzeczowego, postępują według programu użytkowania, który ucieleśniony jest w tym produkcie; w ten sposób określone socjotechniczne formy działania stają się masowym zjawiskiem społecznym. Również zdolność dysponowania systemami rzeczowymi polega na instytucjach społecznych, takich jak własność i innych społecznie gwarantowanych upoważnieniach do użytkowania. I odwrotnie – użytkowanie rzeczy wytwarza właśnie przez to nowe stosunki i zachowania społeczne. Prywatne użytkowanie techniki zależy w dużym stopniu od istnienia publicznych warunków użytkowania; jest to okoliczność, która indywidualistyczne koncepcje techniczne czyni iluzją.

Socjalizacja techniczna

Powiązania między mikro- i makropoziomem tworzą jednak tylko jeden, jeżeli nawet szczególnie ważny, wycinek z obszernego zespołu powiązań warunków i skutków użytkowania systemów rzeczowych. Drugim fenomenem powiązań jest *socjalizacja techniczna*. Lewa połowa rysunku 38 pokazuje jak systemy rzeczowe zastępują umiejętności, wiedzę i wolę człowieka. Tylko niewielu ludzi przykładowo umie wyciągnąć pierwiastek kwadratowy dowolnej liczby za pomocą ołówka i papieru. Wiedza i umiejętności tych nielicznych zostały więc pobrane i uprzedmiotowione w elektronicznych obwodach kalkulatora kieszonkowego. Po tym każdy może, jak to widać po prawej stronie rysunku, przyswoić sobie te obce umiejętności i wiedzę, po prostu przez to, że używa kalkulatora. To właśnie kalkulator jest tym, co jego użytkownikowi użycza społecznej zdolności do działania, polegającej na skutecznym wykonaniu określonej arytmetycznej operacji według reguł nauko-społecznych. Przy tym jednak system rzeczowy ucieleśnia odpowiednią kompetencję, ale oferuje równocześnie cel polegający na zastosowaniu tej kompetencji, nawet gdy jest ona zupełnie obca użytkownikowi.



Rys. 38. Socjalizacja techniczna

W naukach społecznych przez pojęcie socjalizacji rozumie się proces przyswajania i wyjaśniania wartości społecznych, norm i wzorców działaniowych, podczas którego członek społeczności nabywa społecznych zdolności do działania i zachowuje je. W systemach rzeczowych są oczywiście ucieleśnione normy społeczne i wzorce działaniowe, które przyjmuje jednostka, gdy używa systemów rzeczowych. Systemy rzeczowe przejawiają ten sam wpływ na działanie człowieka co abstrakcyjne instytucje społeczeństwa. Dlatego powstawanie systemów rzeczowych można określić jako techniczną instytucjonalizację. W użytkowaniu rzeczy zachodzi jednak faktycznie proces socjalizacji; aczkolwiek komunikatywne przyswajanie ludzkich wyobrażeń jest przy tym zastępowane przez przedmiotowe przyswajanie systemów rzeczowych, w których pewne wyobrażenia jakby się krystalizowały. Ma to głębszy sens, a taki, że mówimy o *uspołecznieniu techniki* i o *technizacji społeczeństwa*.

Powstawanie systemów rzeczowych

Pojęcie rozwoju technicznego

Proces powstawania systemów rzeczowych określa się często jako rozwój techniczny. Inne wyrażenia, jak „postęp techniczny” czy „przemiany techniczne” wydają się mniej szczęśliwe, ponieważ są zbyt empatyczne lub zbyt neutralne. *Rozwój techniczny* lub *geneza techniki* nie powinny być wiązane z mylnymi skojarzeniami. Przede wszystkim na boku trzeba pozostawić wyobrażenia biologiczno-organizmowe, według których ontogenetycznie zarodek rozwija się do założonej w nim postaci lub filogenetycznie jakiś rodzaj ewoluuje przez mutację i selekcję do formy wyższej. Rozwój techniczny jest niczym innym jak przebiegiem czasowym, w którym

rośnie liczebność i różnorodność systemów rzeczowych. Jednak w technologicznym użyciu językowym wyrażenie to pozostaje dwuznaczne, z czego można mieć pewien zysk teoretyczny.

W pierwszym znaczeniu rozwój techniczny odnosi się do procesu powstawania określonego systemu rzeczowego. Skoro się już wycofaliśmy od skojarzeń biologicznych, możemy to, czysto metaforycznie, nazwać *ontogenezą*. Zakłady przemysłowe dysponują komórkami rozwoju i zatrudniają w nich inżynierów pracujących nad tym, aby dla określonych celów planowo wykoncypować odpowiednie środki ich realizacji i uczynić dojrzałymi do produkcji. W powiązaniu z politycznym wspieraniem badań naukowych i rozwoju wnikliwie usiłuje się odgraniczyć rozwój techniczny z jednej strony od badań stosowanych a z drugiej od bezpośredniego przygotowania produkcji. Oczywiście, trudno tu znaleźć przekonujące linie podziału.

Dlatego rozwój ontogenetyczny powinien obejmować całą historię powstawania systemu rzeczowego. Zaczyna się ona w chwili, gdy po raz pierwszy zostaje opisana charakterystyczna funkcja systemu rzeczowego, a sięga przynajmniej do chwili, w której stał się on konkretną rzeczywistością i jest ogólnie stosowalny. Jeżeli doliczy się do tego jeszcze jedną fazę, w której system rzeczowy staje się przestarzały i znika z obrazu, to otrzymuje się koncepcję rozwoju ontogenetycznego. Koncepcja ta w badaniach innowacyjnych nazywa się *cyklem produkcji*. Produkcja materialna w każdym przypadku należy do ontogenezy, szczególnie gdy doświadczenia przy tym nabyte ze wszech miar wpływają na koncepcyjne kształtowanie systemu rzeczowego.

W drugim znaczeniu rozwój techniczny oznacza historię powstawania całej techniki rzeczowej. W tym przypadku może on być nazwany *filogenezą*, albo *technizacją*, gdy włączy się w to idące rozszerzenie zastosowania techniki. W tym sensie rozwój techniczny sięga od początków techniki rzeczowej w czasie prehistorycznym przez technosferę teraźniejszości aż w przyszłość. Rozwój techniczny, jaki znamy dziś, jest w sensie znaczeniowym równoważny z historią techniki¹⁰. Daje się on ujmować historiograficznie i systematyzować strukturalno-historycznie. Natomiast przyszłe etapy rozwojowe filogenezy można przewidywać za pomocą metod prognozowania rozwoju techniki tylko w ograniczonym zakresie; ich podstawą są rozpoznawalne tendencje i prawdopodobieństwo ich występowania. Za tym stoi pytanie, czy w ogóle istnieją prawidłowości, według których podąża rozwój techniczny.

Okresy historii techniki

Przedstawienie okresów filogenezy technicznej i faz ontogenezy technicznej rozpoczyna ROPOHL od zestawienia okresów na jakie można podzielić historię techniki. Pierwsza kolumna rysunku 39 zawiera ogólnie znane, główne epoki historii starożytnej. Podział ten jest stosowany czasem również przez historię techniki, gdy mówi się o technice antycznej czy renesansowej.

Druga kolumna ukazuje podział spotykany dziś coraz częściej. Według niego w historii ludzkości miały miejsce dwa rewolucyjne przełomy socjotechniczne: (1) rewo-

¹⁰ w sensie tego, co się dzieje w rozwoju technicznym, a nie w sensie nauki, która to bada

lucja agrarna, w której ludzie przed około dziesięcioma tysiącami przechodzili ze zbieractwa i myślistwa na uprawę roli i hodowlę bydła, oraz (2) rewolucja przemysłowa końca XVIII i początku XIX wieku, którą charakteryzuje mechanizacja maszyn roboczych. Niektórzy uważają, że elektryfikacja i chemizacja na przełomie XIX i XX wieku może być traktowana jako druga rewolucja przemysłowa. Podobnie rozwój w drugiej połowie XX wieku, nacechowany głównie automatyzacją, traktować można jako trzecią rewolucję przemysłową (w terminologii marksistowskiej „rewolucją naukowo-techniczną”), a dzisiejszy rozwój, nacechowany głównie informatyzacją, jako czwartą rewolucję przemysłową. Takie numerowanie rewolucji nie ma niczego nielogicznego; dlatego bardziej racjonalne jest nazwanie tych trzech ostatnich rewolucji po prostu rewolucją informatyczną, w której oczywiście jest automatyzacja, technika informatyczna i technika genetyczna.

Trzecia kolumna przedstawia podział jaki zaproponował ORTEGA Y GASSET. Kryteria jego podziału są nie tylko chronologiczne, ale również techniczno-filozoficzne. Technika przypadku jest techniką ludzi prehistorycznych. Cechuje ją ograniczoność umiejętności technicznych i powiązanie ich z przyrodą, wskutek braku podziału pracy w produkcji, oraz przypadkowość wynalazków. Technika rzemieślników jest techniką starożytnej Grecji, przedcesarskiego Rzymu i średniowiecza. Obszar czynności technicznych rośnie; wiedza i umiejętności techniczne są jednak zdominowane przez tradycję; nadal dominuje proste użycie narzędzi; wynalezienie i wykonanie pozostaje w ręku tej samej osoby. Dopiero od czasów nowożytnych rozwija się technika techników, taka jaką znamy dziś.

Epoki historyczne	Rewolucyjne przełomy sociotechniczne	ORTEGA Y GASSET	GÜNTHER + BENSE	Rewolucje wg RIBEIRO
prehistoria	agrarna	technika przypadku		agrama
wczesna historia				urbanistyczna
				nawodnieniowa
starożytność		technika rzemieślników	technika klasyczna	metalurgiczna
średniowiecze				pasterska
odrodzenie				merkantylna
czasy nowożytne	przemysłowy	technika techników		przemysłowa
czasy najnowsze	informatyczny			technika transklasyczna

Rys. 39. Perodyzacje rozwoju techniki

Inny podział (GÜNTHER + BENSE) widzi w mechanizacji technikę klasyczną, w automatyzacji zaś transklasyczną technikę procesów informacyjnych. Technika klasyczna ma do czynienia głównie z procesami makrofizycznymi, a transklasyczna z procesami mikrofizycznymi. Charakterystycznymi przykładami tej ostatniej są: chemia tworzyw sztucznych, mikroelektronika i technika jądrowa. Dziś można to uzupełnić o opierającą się na mikrobiologii biotechnikę i technikę genetyczną.

W ostatniej kolumnie (według RIBEIRO) widać dość zróżnicowaną periodyzację rozwoju socjotechnicznego. Obok rewolucji agrarnej i przemysłowej identyfikuje on dalszych sześć rewolucji technologicznych. Pojęcie rewolucji technologicznej oznacza przemiany w instrumentalnym wyposażeniu panowania ludzi nad przyrodą lub w wyposażeniu do prowadzenia wojny.

Historycy spierają się o to, czy historię techniki można w ogóle periodyzować. Periodyzowanie daje jednak pewną tymczasową orientację. Jeżeli spróbuje się podsumować *typowe tendencje* obecnego okresu technizacji, to widać, że ogólne cechy rozwoju technicznego w ostatnich dziesięcioleciach doznały niebywałego i po części dramatycznego wzrostu. Dotyczy to przede wszystkim *ilościowego pomnożenia* systemów rzeczowych; przykładem mogą być choćby telefony komórkowe.

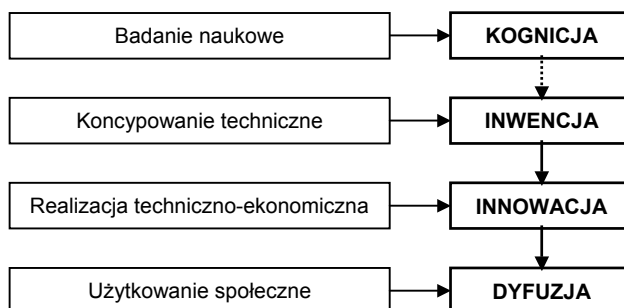
Co więcej, systemy rzeczowe podlegają ciągle *zmianom jakościowym*. Zmiany te zwykle dotyczą wzrostu wydajności i zdolności użytkowych, a czasami nawet trwałości lub wysiłku potrzebnego do nabycia i stosowania. Obie tendencje łączą się szczególnie w technice komputerowej, gdzie żywotność ograniczona jest częściej przez techniczne zestarzenie się niż przez fizyczne zużycie. Ponadto technizacja otwiera ciągle *nowe funkcje działania*: Rozwija i opracowuje się nowatorskie systemy rzeczowe w celu zastąpienia lub uzupełnienia tych pól działania człowieka, które dotychczas nie zostały „dotknięte” przez technikę. Wystarczy pomyśleć o technice medycznej, technizacji obrotu pieniężnego czy zastosowaniu komputerów w naukach humanistycznych.

Ilościowe rozmnożenie, jakościowa zmiana i rozprzestrzenienie na nowe pola działania są ogólnymi charakterystykami technizacji. Oprócz tego, dla czasów najnowszych szczególnie charakterystyczne jest niebywałe przyspieszenie tego rozwoju w czasie. Pokazują to liczne mierniki, jak liczba publikacji technologicznych i patentów w jednostce czasu, liczba naukowców i inżynierów pracujących w rozwoju technicznym, procent nowych produktów w całościowym programie przemysłowych zakładów produkcyjnych i szybkość rozprzestrzeniania się nowych produktów. Ilościowe przyspieszenie wzmacniane jest *jakościowym przeplataniem*. Rośnie powiązanie poszczególnych technik. W technice informacyjnej sieci prowadzą do obszernej integracji mediów. Dotyczy to nie tylko techniki informatycznej. Przykładem szczególnym jest właśnie mechatronika, która dziś wchodzi we wszystkie obszary techniki klasycznej i przekracza tradycyjne granice między budową maszyn i elektrotechniką. W ten sposób wszystkie poszczególne techniki spletają się w jednej globalnej technosferze, w której również coraz bardziej dochodzą do głosu zmienne oddziaływania ekotechniczne i technopolityczne. Ta rosnąca innowacyjna dynamika technizacji prowadzi również do pytania: Czy ludzie rzeczywiście

mogą wytrzymać tak przyspieszone zmiany ich warunków życia i czy leżąca u podstaw tego zasada nieograniczonego rozwoju daje się zachować na trwałe?

Fazy ontogenezy technicznej

Filogeneza techniczna jest dynamicznym systemem niezliczonych ontogenetycznych etapów rozwoju. Pojedyncza ontogeneza jest mniej lub więcej samowolnym wyciągiem ze strumienia filogenezy. Strumień ten można wprowadzić oddzielnie potraktować analitycznie, ale w rzeczywistości jest on z reguły powiązany w ten lub inny sposób z innymi etapami rozwoju. Rysunek 40 należy więc rozumieć jako schemat idealny, rozpowszechniony w ekonomiczno-technologicznym badaniu innowacji.



Rys. 40. Fazy ontogenezy technicznej

Z zasady przebieg powstawania systemu rzeczowego nowego rodzaju rozpoczyna się *wynalazkiem* (lub *innowacją*), który stanowi pierwszą koncepcję nowej rzeczywistości. Tę koncepcję w dalszym przebiegu rozwoju najpierw konkretyzuje się ideowo i na koniec materialnie. Niekiedy wynalazek jest poprzedzony poznaniem (*kognicją*) nieznanych do tej pory zjawisk i praw przyrodniczych, które otwierają nowy potencjał naukowo-techniczny. Wyrażenie „kognicja” nie jest zresztą rozpowszechnione w badaniach innowacyjnych, jako że niektórzy badacze innowacji nie widzą różnicy między odkryciem naukowym i wynalazkiem technicznym. W istocie obie te fazy rozwoju są z gruntu różne i stoją, jak to wskazuje na schemacie strzałka przerywana, w dość luźnym związku. Z jednej strony długo żadna kognicja nie prowadzi automatycznie do wynalazku, z drugiej zaś istnieje obfitość wynalazków, które nie są bezpośrednio wyprowadzone z kognicji. W tym potwierdza się podstawowy pogląd nowej filozofii techniki, że redukcja techniki do stosowanych nauk przyrodniczych byłoby czymś dziwnym. Kognicja jest więc możliwa, ale w żadnym przypadku nie niezbędną fazą ontogenezy.

Struktura i funkcja nowego systemu rzeczowego powstaje dopiero w fazie *inwencji*. Są one tu po raz pierwszy, przynajmniej w zasadzie, opisywane jednoznacznie i werbalnie, rysunkowo oraz przedstawiane w postaci rzeczywistego modelu lub prototypu. W prawie patentowym od wynalazku żąda się nowości, postępu, poziomu wynalazku i użyteczności; poziom wynalazku oznacza, że nowość wyraźnie

przewyższa typowe osiągnięcia pracy przeciętnych inżynierów, tak zwany stan techniki. Przez urząd patentowy wynalazek jest uznawany również wtedy, gdy wynalazca nie ma wiedzy teoretycznej, leżącej u podstaw jego wynalazku. W tym potwierdza się również to, że kognicja nie jest żadnym niezbędnym warunkiem wynalazku. Wynalazek jest jednak źródłem techniki.

Literatura patentowa jest pełna wynalazków nigdy niezrealizowanych w praktyce. Dlatego trzeba przyjąć dalszą fazę ontogenezy – *innowację*. Ma ona miejsce całkowicie w organizacji gospodarczej i uchodzi za zadanie przedsiębiorcy. Jeżeli wynalazca-inżynier realizuje ten etap samodzielnie, to mówi się o wynalazcy-przedsiębiorcy. Mimo coraz większej liczby wielonarodowych dużych przedsiębiorstw, tacy wynalazcy-przedsiębiorcy odgrywają jeszcze dziś pewną rolę. Polityka technologiczna państwa wspiera ich projekty innowacyjne różnymi środkami, jak centra założycielskie, parki technologiczne itp. Inna część czynności innowacyjnych ma miejsce w oddziałach rozwojowych dużych przedsiębiorstw. Według znaczenia naukowo-technicznego różni się innowacje podstawowe i innowacje ulepszające, oczywiście bez jasnego odgraniczenia. W każdym razie innowacje ulepszające i innowacje imitujące znaczą już przejście do ostatniej fazy ontogenezy – *rozpowszechnienia (dyfuzji)*. Polega ona na tym, że system rzeczowy zostaje ogólnie wprowadzony i użytkowany.

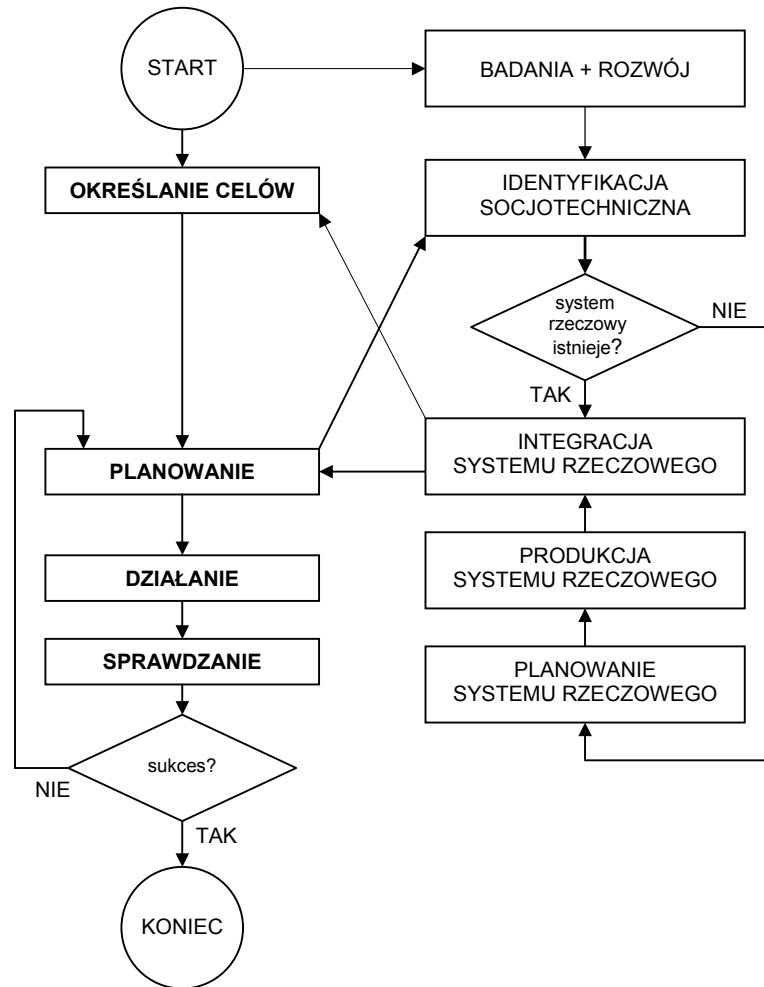
Wynalazek jako pomysł użytkowy

Wynalazek jest więc koniecznym warunkiem każdego rozwoju technicznego; innowacja i jej rozpowszechnienie stają się wystarczającym warunkiem technizacji. Fazy te można zrekonstruować za pomocą pojęć teorii działania przedstawionych na rysunku 17 i uzupełnionych na rysunku 34. Pozwala to sprecyzować istotę wynalazku. Lewa połowa rysunku 41 pokazuje znany obwód działaniowy. Z prawej strony u góry jest socjotechniczna identyfikacja, ten podstawowy etap, w którym przedstawia się daną lub możliwą funkcję systemu rzeczowego, równoważną planowanej funkcji działania lub funkcji pracy.

Dla planowanej funkcji działaniowej lub pracowej, której technizację się przewiduje, trzeba zaprojektować przede wszystkim jakiś system rzeczowy. Tak więc identyfikacja socjotechniczna okazuje się zarodkiem wynalazku, dla którego teraz należy określić właściwy potencjał techniczny. W tym celu można czasami uciec się do wzorców doświadczalnych, jakie sprawdziły się podczas podobnych zadań; inaczej trzeba wynaleźć nową koncepcję realizacji, do czego czasem może być potrzebna nowa wiedza z badań i rozwoju. Przejście do produkcji można przyporządkować fazie innowacji, a wprowadzenie nowego systemu rzeczowego w działania związane z użytkowaniem oznacza początek rozpowszechniania. Ponieważ przebieg rozwoju, oznaczony grubszymi strzałkami na rysunku 41, wychodzi z wyobrażanego użytkowania techniki, można go nazwać przebiegiem zdominowanym przez użytkowanie.

Istnieje również przebieg rozwoju zdominowany przez potencjał (cienkie strzałki na rys. 41). Najpierw, niezależnie od konkretnych wyobrażeń użytkowych, instytuty badawcze i laboratoria przemysłowe badają w naukach przyrodniczych i technicz-

nych wszystkie możliwe zjawiska i efekty, które albo same z siebie występują w przyrodzie lub mogą być przedstawione w mniej lub bardziej sztucznych warunkach badawczych. Ta systematyczna działalność badawczo-rozwojowa odkrywa ciągle nowe potencjały, dla których na początku nie widać żadnego bezpośredniego zastosowania.



Rys. 41. Struktura przebiegu genezy techniki

Właściwy wynalazek polega zawsze na tym, że dla istniejącego potencjału znajduje się użytek, a dla użytku potencjał.

Wynalazek występuje jako funkcjonalny i jako strukturalny. To rozróżnienie wiąże się z „filozofią wynajdowania”, zaproponowaną prawie sto lat temu. „Kto skutecznie pokazuje środki i drogi osiągnięcia celu dotychczas nieosiągniętego w obszarze

działania materialnego, lub kto pokazuje nowe drogi i środki osiągnięcia celu już znanego, dokonuje wynalazku” [ЕУТН 1905]. Jeżeli przez „cel dotychczas nieosiągnięty” rozumieć będziemy pierwszą technizację jakiejś funkcji działaniowej lub pracowej, to pierwsza część tej definicji charakteryzuje wynalazek funkcjonalny; natomiast druga wynalazek strukturalny, który dla funkcji już wcześniej technizowanej podaje nową strukturę. Prawdziwy *wynalazek funkcjonalny* zawiera koncepcję nowego pomysłu użytkowego i nowego potencjału równocześnie; przykładem może być maszyna parowa. Są również wynalazki funkcjonalne, które dla znanego już potencjału projektują nową funkcję działania. W granicznym przypadku odbywa się to nawet przy nieplanowym zastosowaniu wielofunkcyjnych systemów rzeczowych przez użytkownika. W normalnym przypadku rozwoju technicznego zwykle struktura bywa modyfikowana dla nowego użytkowania; przykładem może być telefaks – nowa funkcja dla starego telefonu.

Jednak w rozwoju technicznym częściej występują *wynalazki strukturalne*, które dla funkcji już wcześniej technizowanej przewidują nową strukturę. Nowa realizacja jest bowiem wydajniejsza i tańsza niż stara. Tak było dla tranzystora, gdy przejął on funkcję lampy elektronowej. Duża część rozwoju technicznego polega na tym, że znane struktury stosuje się dla innych, już znanych funkcji. РОРОНЛ nazywa to *wynalazkami przenoszonymi (Übertragungserfindungen)* i podaje przykład płyty CD, w której struktura, znana z tradycyjnej płyty gramofonowej, przeniesiona została, w nowego rodzaju sposób, na również znaną funkcję magazynowania danych komputerowych.

Dla wszystkich rodzajów wynalazków wspólne jest w istocie sprowadzenie do pokrycia jakiegoś pomysłu użytkowego z wiedzą o jakimś potencjale technicznym; różnią się one tylko tym, że pomysł i potencjał realizuje się albo na nowo albo są one już znane. W wynalazkach strukturalnych idea użytkowa jest już znana i potrzebuje tylko nowego potencjału, aby móc być lepiej zrealizowaną. Wynalazek funkcjonalny jest natomiast równoznaczny z wynalazkiem systemu rzeczowego; tworzy on nową identyfikację socjotechniczną.

Intuicjonistyczna koncepcja wynalazku

Intuicjonistyczna koncepcja powstawania wynalazku mówi, że wynalazek jest procesem uzyskiwania i przetwarzania informacji, przebiegającym w dużej części poniżej progu kontroli racjonalnej. Oznacza to, że czynności wynalazczych nie można ani przekazywać w sensie komunikacji, ani planowo nimi sterować. Warunkami stymulującymi te nieświadome procesy wynalazcze są z jednej strony dyspozycje osobowe, zaś z drugiej – pozaosobowe warunki brzegowe. Ciekawe, że zarówno cechy osobowościowe – nonkonformizm, zdolność do krytyki itd. – jak również warunki brzegowe – nieprzywiązanie do czasu i miejsca, wolność w wyborze celów i metod pracy itd. – stoją w wyraźnej opozycji do psychospołecznej rzeczywistości organizacji przemysłowo-gospodarczych. Wydaje się to być pocieszające, jeżeli uważa się, że dynamika innowacyjna technizacji już dziś przeciąża większość ludzi.

Koncepcja intuicjonistyczna dotyczy przeważnie pojedynczych osób i dlatego można ją traktować jako mikroteorię. Jeżeli przez wynalazek rozumiemy przede wszystkim

wysiłek asocjacyjno-kombinacyjny, to nie może on powstać nigdzie indziej niż w głowie człowieka. Dużą rolę mogą tu również odgrywać pozaosobowe warunki brzegowe, jak otoczenie społeczne, w którym wynalazca żyje i pracuje. W tym celu proponuje się określone formy komunikacji grupowej, mogące pobudzać indywidualną „produkcję” pomysłów. W procesie kolektywnego wspomagania kreatywności (burza mózgów i podobne) wzajemne zachęcanie i „zapładnianie” członków grupy stanowi istotny warunek sukcesu. W ten sposób intuicjonistyczna koncepcja wynalazku przekracza mikro poziom i włącza do rozważań psychospołeczne procesy grupowe na mezopoziomie.

Racjonalistyczna koncepcja wynalazku

Racjonalistyczna koncepcja wynalazku powstała w nauce o projektowaniu i konstruowaniu. Psychologiczny opis koncepcji intuicjonistycznej zawiera niejawnie założenie, że wynalazek można rozumieć jako nowego rodzaju kombinację znanych elementów. W koncepcji racjonalistycznej założenie to zostało podniesione do rangi zasady metodycznej. Postuluje ona, że powiązania, ujawniające się w nieświadomy i niekontrolowany sposób, można za pomocą odpowiednich procedur obiektywizować, systematycznie wytwarzać i intersubiektywnie poznawać. Przykładem może być pokazana na rysunku 42 wielowymiarowa metoda klasyfikacyjna, zwana metodą morfologiczną lub macierzą eksploracji [BRANOWSKI 1999].

wyróżnik cechy cecha	(1)	(2)	(3)	(4)
(A)	<input type="text"/>	A2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
(B)	B1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
(C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	C4
(D)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	D3	<input type="text"/>
(E)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	E4
(F)	F1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Rys. 42. Macierz morfologiczna

Metoda ta wychodzi z założenia, że istniejący przedmiot poznania lub możliwy przedmiot kształtowania można charakteryzować wieloma cechami. Proste podziały otrzymuje się dla jednej jedynej cechy, dla której wypisuje się różne jej wyróżniki.

Jeżeli potrzebne są dwie cechy, to ich wyróżniki można wstawić w kolumny i wiersze tabeli, jak w klasyfikacji systemów rzeczowych na rysunku 26. W macierzy morfologicznej natomiast bierze się więcej niż dwie cechy i przyporządkowuje się każdej z nich jeden wiersz; w schemacie na rysunku 42 jest to sześć cech, od A do F. W ten sposób próbuje się wypełnić poszczególne wiersze, przy czym każdorazowo nanosi się wszystkie możliwe do pomyślenia wyróżniki cech, jakie bierze się pod uwagę dla opisu lub ukształtowania przedmiotu; w przykładzie są to wyróżniki od 1 do 4, jednak liczba w wierszu może się zmieniać.

Teraz można zastosować proces kombinowania, z którego wyjdzie rozwiązanie zadania wynalazczego. Każdemu rzeczywistemu lub możliwemu przedmiotowi przypada mianowicie po jednym wyróżniku z każdej cechy. Przykładowo ukazana jest kombinacja (A2, B1, C4, D3, E4, F1), ale w zasadzie można utworzyć każdą inną kombinację. Według reguł kombinatoryki oblicza się całkowitą liczbę możliwych kombinacji, mnożąc przez siebie każdorazową liczebność wyróżników, wiersz po wierszu. W omawianym przykładzie trzeba 6 pomnożyć 4 razy przez siebie, co daje $6 \times 6 \times 6 \times 6$, a więc 4096. Jeżeli elementy macierzy reprezentują wszystkie wyobrażalne elementy rozwiązania tworzonego systemu rzeczowego, to macierz obejmuje całość wszystkich możliwych do pomyślenia rozwiązań, a więc całość wynalazków, które spełniają wybrany opis cech. Z powodu dużej liczby kombinacji są wśród nich nie tylko wynalazki, które są znane od dawna, lecz również wynalazki nowe, i te wybiera się ze zbioru rozwiązań.

Na pierwszy rzut oka metoda ta wygląda elegancko i może się wydawać, że jest w stanie rozwiązywać systematycznie wszystkie problemy wynalazcze. W rzeczywistości jednak istnieją trudności zasadnicze i praktyczne. W praktyce porażenie sobie z obfitością informacji i ocena jej są uciążliwe i zajmują dużo czasu; aby dokonać wyboru optymalnego, trzeba przecież przejrzeć tysiące kombinacji. Oczywiście można treść takiej macierzy i algorytm kombinowania powierzyć programowi komputerowemu; oczywiście niespójności, jakie mogą powstać między wyróżnikami cech, można przy tym scharakteryzować od razu w programie, żeby wydawane były tylko kombinacje rzeczywiście dające się zrealizować. Ale nawet wtedy wysiłek na przejrzanie i wybór jest znaczny, szczególnie że nie istnieją sprawdzone algorytmy oceny dla takich ilościowych koncepcji i nie należy ich oczekiwać.

Jeszcze bardziej ważki jest zarzut, że metoda zakłada, że można cechy rozwiązania i wyróżniki cech jakby wydedukować bez budowania macierzy w ogóle. Metoda ma wprawdzie zaletę, że nie pozostaje ograniczona do mniej lub bardziej przypadkowego zasobu doświadczenia jednostki; stosując racjonalne zasady postępowania liczni eksperci mogą uczestniczyć w wypełnianiu skrzynki morfologicznej, a idealnie jest, gdy zadaniem instytutów zajmujących się nauką konstruowania stanie się przygotowanie pełnych wspomaganých komputerowo katalogów rozwiązań. Ale wtedy subiektywne nastawienia wstępne orientują pole możliwych rozwiązań.

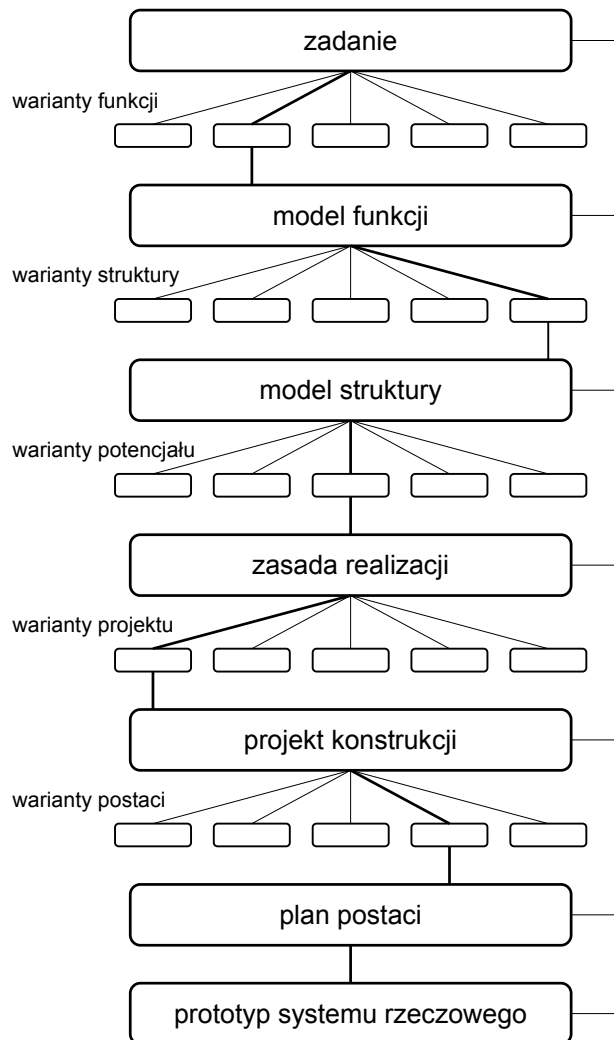
Podstawowe wynalazki polegają jednak na tym, że albo identyfikowany jest nowy dotychczas nieznaną wyróżnik cechy, przede wszystkim nowy potencjał z badań; albo na tym, że same cechy definiuje się w nowy sposób. W pierwszym przypadku trzeba jedynie uzupełnić odnośny wiersz macierzy; w drugim jednak trzeba zmienić

budowę macierzy. Jeżeli na przykład opracowano macierz morfologiczną systemów napędowych, w której występuje cecha „wytwarzanie momentu obrotowego”, to nie wynajdzie się przy tym silnika liniowego, który jak wiadomo dostarcza energii mechanicznej bezpośrednio w formie posuwistej. Kreatywne szanse miałyby się tylko wtedy, gdyby odpowiednią cechą wykoncypować bardziej ogólnie, np. „przemiana energii elektrycznej w energię ruchu posuwistego”. Metoda morfologiczna cierpi więc na ograniczenie polegające na tym, że podstawowe nowości wykazuje tylko wtedy, gdy są one od samego początku wprowadzone do algorytmu.

Temu problemowi można w pewnej mierze wyjść naprzeciw przez to, że zadanie wynalazcze najpierw sformułuje się tak abstrakcyjnie, jak jest to możliwe. W tym celu nauka konstruowania posłużyła się teorią systemów rzeczowych. Dla tego teoretycznego modelu opisowego zakłada się, że obejmuje on wszystkie dające się pomyśleć systemy rzeczowe. Wtedy jednak automatycznie wynika wniosek, że taka systematyka zawiera również te systemy rzeczowe, które jeszcze nie zostały wynalezione. Wynajdowanie okazuje się więc czynnością, która obejmuje w tym samym stopniu umiejętność konkretyzowania i kombinowania. W rzeczywistości nauka konstruowania zaproponowała nie tylko zasadę wariacji kombinatorycznej ale również metodyczną strukturę przebiegu, przewidującą kilka etapów rozwojowych o rosnącej konkretyzacji (rys. 43).

Dla znajdowania struktury model funkcji jest już zdefiniowany; dla znajdowania funkcji natomiast trzeba najpierw mniej lub bardziej określone zadanie technizacji przełożyć na możliwe warianty funkcji, z których następnie wybierze się najbardziej odpowiedni model funkcji. Przejście od modelu funkcjonalnego do modelu strukturalnego nie musi być wyprowadzone automatycznie. Dla możliwych wariantów struktury potrzeba dodatkowych informacji, które można uzyskać za pomocą metody morfologicznej. Ale również wybrany w końcu model struktury pozostaje bardzo abstrakcyjny i jeszcze nie mówi nic o przedmiotowej realizacji nowego systemu rzeczowego. Dlatego w następnym etapie należy przebadać potencjały przyrodnicze i techniczne, którymi można zrealizować zaplanowaną strukturę. Jeżeli znowu w tym celu chce się wypełnić skrzynkę morfologiczną, to można wykorzystać opracowane systematyki efektów przyrodniczych. Z wariantów potencjalnych wybiera się wtedy zasadę realizacji.

Aż do tego etapu rozwoju mówi się najczęściej o „koncypowaniu”. W kolejnym etapie, nazywanym często „projektowanie” należy zasadę realizacji skonkretyzować konstrukcyjnie. Założmy, że dla wyłączalnego przekazywania momentu obrotowego z jednego wału na drugi wybrano fizyczny efekt tarcia. W konkretyzowaniu konstrukcyjnym mamy wtedy do dyspozycji sprzęgło stożkowe, sprzęgło tarczowe i sprzęgło wielopłytkowe. Jeżeli zdecydowano się na te warianty projektowe, to dla projektu konstrukcyjnego rozważa się różne warianty postaci, różniące się materiałem, kształtowaniem, wymiarami itd. Wybrany wariant postaci opisuje się ściśle w szczegółowych rysunkach. Etap ten nazywa się „rozpracowywanie konstrukcji”; granice między koncypowaniem, projektowaniem i rozpracowywaniem są jednak w nauce konstruowania przyjmowane różnie, niejednolicie. Na koniec idealnie antycypowany system rzeczowy może być więc realizowany w postaci prototypu.



Rys. 43. Etapy rozwoju systemu rzeczowego

Każde przejście z jednego etapu rozwoju do następnego wymaga dodatkowej informacji i tworzy kreatywny proces cząstkowy. Byłoby złudzeniem, gdyby chciało się z racjonalnej precyzji technologicznego modelu systemu wyciągać wnioski, że wynalazki samoczynnie biorą się z automatycznego algorytmu. Nawet jeżeli dla każdego przejścia między etapami rozwoju zastosuje się metodę morfologiczną, to można wprawdzie obiektywizować i systematyzować poszukiwanie informacji, ale nie można w żaden sposób wymusić rzeczywiście nowej informacji. W ten sposób z zasadniczych i racjonalnych powodów przecenia się racjonalistyczną koncepcję wynalazku, przypisując jej prawo monopolu. Szczególnie wtedy, gdy nie analizuje

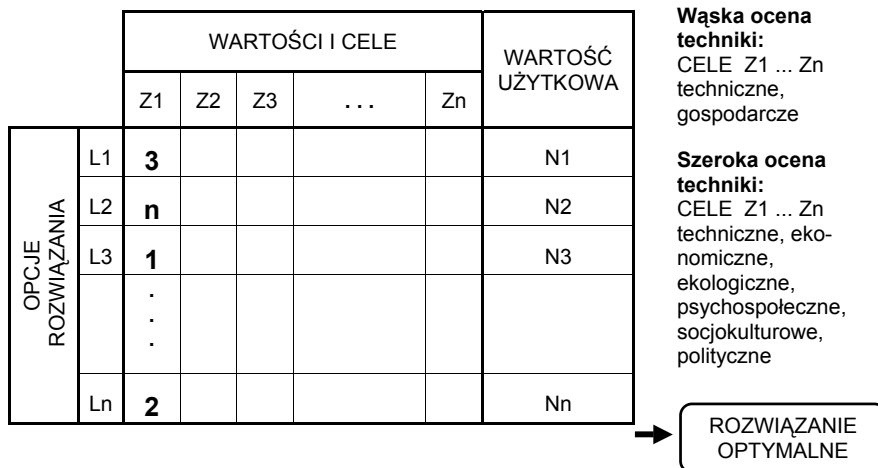
się deskryptywnie faktycznej czynności wynalazczej i konstrukcyjnej, lecz preskryptywnie chce się prowadzić tę czynność metodycznie, instrukcyjnie. Jak skuteczne mogą być takie instrukcje, to sprawa dyskusji między znawcami. Wiele jednak wskazuje na to, że synteza koncepcji intuicjonistycznej – w psychologicznym sprecyzowaniu – i koncepcji racjonalistycznej jest tu na miejscu.

Jednak koncepcja racjonalistyczna ma tę szczególną zaletę, że wspiera refleksję problemu oceny. Ciągłe jeszcze spotyka się u inżynierów postawę, jakoby ich działanie techniczne było neutralne w stosunku do wartości. To błędne wyobrażenie, mające wiele powodów, wynika jednak z intuicjonistycznej praktyki, która nie zdaje sobie sprawy ze swych podstaw dotyczących wartości. W rzeczywistości proces rozwoju i konstrukcji jest ciągłą serią ocen i decyzji, nawet wtedy, gdy przebiega intuicyjnie. Zaczyna się to od wstępnego zrozumienia zadania rozwojowego, następnie od wyboru wiedzy uważanej za istotną i w końcu dotyczy wszystkich szczegółów do pomyślenia; jak np. przyjmując tak ważną wielkość obliczeniową jak współczynnik bezpieczeństwa, lub jak zymiarować mniej ważne grubości ścianek. Przede wszystkim przy intuicyjnym poszukiwaniu możliwości rozwiązań ciągle są pomysły, które na krótko trafiają do świadomości, są szybko odrzucane wskutek implikowanych wyobrażeń wartościujących, aż w końcu pomysł rozwiązania wydaje się wystarczająco silny, aby go rozpracować dalej. To, że z obfitości tego co możliwe, za pomocą doświadczenia i intuicji, bardzo często szybko można wybrać pomysł obiecujący sukces, jest czasami widziane nawet jako zaleta koncepcji intuicjonistycznej, ponieważ przyspiesza to proces rozwojowy. Ale jednak istnieje niebezpieczeństwo, że pierwsze lepsze rozwiązanie przyjmie się po prostu za najlepsze.

Koncepcja racjonalistyczna natomiast rezygnuje, w każdym razie idealistycznie, z każdej niekontrolowanej decyzji wstępnej, aż do powstania szerokiego spektrum możliwych do pomyślenia możliwości rozwiązań. Jako wynik otrzymuje się obfitość opcji (możliwości), które dopiero wtedy poddaje się ocenie. Ponieważ te wszystkie alternatywy najpierw jakby powiedzieć stoją równoprawnie obok siebie, problematyka oceny i wyboru staje się najważniejsza. Rysunek 44 pokazuje złożoność problemu oceny. Z jednej strony istnieje nie tylko intuicyjnie uzyskane rozwiązanie, lecz są liczne opcje, z których należy wybrać rozwiązanie optymalne; z drugiej strony opcji tych nie należy mierzyć jednym jedynym celem, lecz skonfrontować ze zbiorem celów, właśnie systemem celów. Teoretycznie priorytet ma oczywiście cel funkcjonalny, polegający na możliwie dobrym zrealizowaniu pierwotnie wykoncypowanej funkcji działania lub funkcji pracy. Praktycznie jednak występują liczne dalsze cele w punkcie widzenia, które albo są do rozpatrzenia dla wyboru między funkcjonalnie równoważnymi alternatywami, albo w ogóle podają niezbędne restrykcje; chodzi tu prawie zawsze o opłacalność.

Schemat na rysunku 44 jest macierzą, której elementy scharakteryzowane są każdorazowo przez opcję rozwiązania w odnośnym wierszu i przez jej przyczynę do celu w każdorazowej szpalcie. Najpierw przyjmowano, że można by dla każdej opcji zebrać przyczynki celowe całego wiersza w jedną liczbę i następnie łatwo rozpoznać te opcje, które wykazują najlepszą wartość liczbową. Ta metoda oceny, jako *analiza wartości użytkowej*, jest jeszcze dziś w użyciu, szczególnie że daje się

wygodnie schematyzować w programach komputerowych. Słabości teoretyczne tej metody znane są jednak od dawna. Przede wszystkim nie wolno wierzyć że przyczynki do różnych celów dają się mierzyć za pomocą tej samej miary. Również gdy każdorazowe przyczynki celowe mogłyby być mierzone na kardynalnej skali o jednakowych interwałach, to różne wielkości pomiarowe miałyby różne znaczenia, które są trudno porównywalne. Zwykle jednak nie istnieją takie założenia teoretyczno-pomiarowe, które pozwalałyby na to, aby wartości liczbowe w macierzy traktować jako wielkości obliczeniowe, które można poddać operacjom matematycznym. W istocie przyczynki celów w kolumnie tworzą zwykle skalę zwykłą, która podaje jedynie rangową kolejność wśród alternatyw: jedna jest lepsza niż druga i mniej dobra niż trzecia. Takich liczb porządkowych nie można jednak dodawać i mnożyć, ponieważ nie reprezentują żadnej absolutnej wartości liczbowej. Schemat oceny nie nadaje się więc na algorytm obliczania.



Rys. 44. Schemat oceny problemu

To co schemat jednak może, rozpoznaje się w kontraście do koncepcji intuicjonistycznej. Schemat ten zmusza do wyrażenia wszystkich opcji wchodzących w grę oraz do otwartego wyłożenia wszystkich celów, jakie przyświecają projektowi rozwojowemu. Przez to problem decyzyjny staje się nie tylko przejrzysty dla każdej osoby, lecz również zrozumiały dla innych; gdy obiektywizuje się go metodycznie, to czyni się go dostępnym dla komunikacji intersubiektywnej. O każdym sformułowaniu celu, o każdym ważeniu celów i każdym elemencie macierzy każdy sam będzie rozmyślać, a gremium decyzyjne będzie się kłócić. Niezbite wartości liczbowe, które mogłyby wymuszać określoną decyzję, nie dają się obliczyć, ale złożona jakościowa decyzja, którą w końcu podjęła pojedyncza osoba lub gremium, w każdym przypadku weźmie pod uwagę wszystkie wymiary problemu i przede wszystkim rozważy wyraźnie cele konkurujące. Analiza wartości użytkowej nie może zastąpić decyzji człowieka, ale może ją skutecznie wspomóc.

Z punktu widzenia *innowacyjnej oceny techniki* tego rodzaju środki metodyczne do przewyżczenia złożoności są niezbędne. Ścisła ocena techniki (porównaj rys. 32), typowa dla dzisiejszych czasów, uwzględnia przede wszystkim cele techniki rzeczowej i cele gospodarcze. Jeżeli jednak nowinki techniczne od samego początku mają być kształtowane również w dopasowaniu do otoczenia (środowiska) i człowieka, to system celów, regulujący proces wynalazczy i proces rozwojowy, rozszerza się o wymiary ekologiczne, psychospołeczne, socjokulturowe i polityczne. Te dodatkowe wymiary, których nie można oczywiście kwantyfikować zwykłymi wartościami liczbowymi, będzie można tylko wtedy odpowiednio uwzględnić dla przyszłościowych strategii innowacyjnych, gdy włączy się je w systemowe modele jakości.

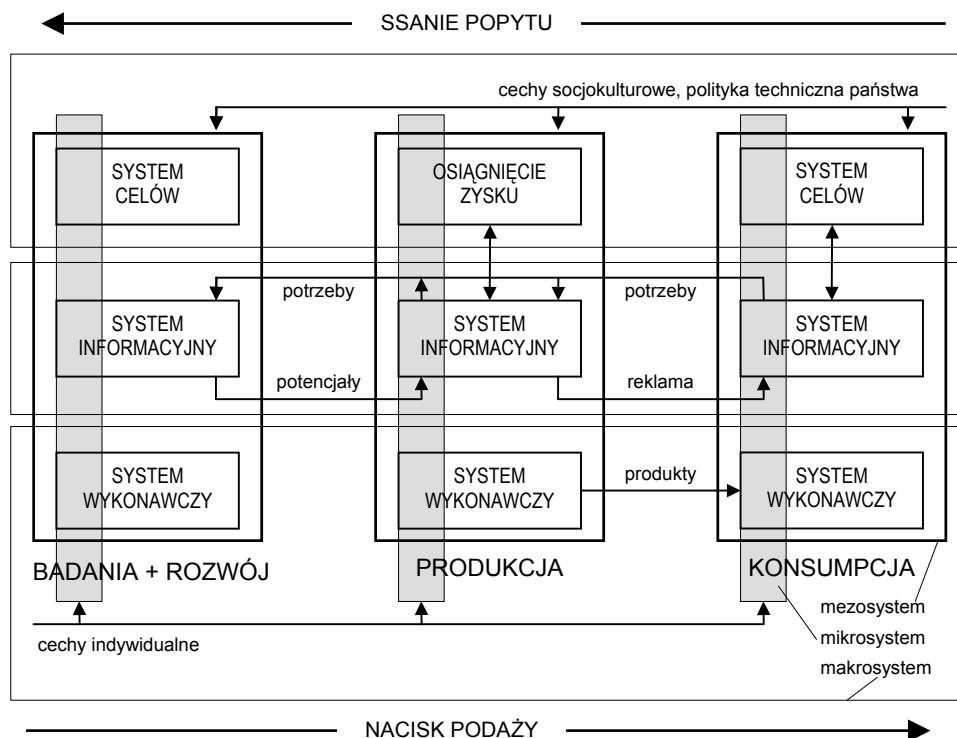
Model genezy techniki

Model ten opiera się na czterech założeniach teoretycznych:

1. Filogeneza techniczna jest dynamicznym systemem ontogenezy technicznych.
2. Rozwój techniczny i zastosowanie systemów rzeczowych wzajemnie na siebie oddziałują.
3. Rozwój techniczny nie może być wyjaśniany tylko jednym, jedynym czynnikiem, lecz wynika ze współdziałania wielu czynników, które ze swej strony znowu poddawane są wpływom przez rozwój.
4. W rozwoju technicznym uczestniczy każdy z trzech poziomów hierarchii (mikro-, mezo- i makropoziom); jego przebieg zależy również od form podziału pracy i powiązania pracy wewnątrz tych hierarchii.

Model ten (rys. 45) jest dość złożony. Najpierw widzimy, jako grubo zarysowane prostokąty, trzy socjotechniczne systemy działaniowe mezopoziomu. Obrazują one produkcję wiedzy w badaniach i rozwoju, produkcję rzeczy w zakładach wytwórczych i stosowanie rzeczy w organizacjach konsumenckich, przede wszystkim w gospodarstwach domowych. Jeżeli zauważy się podwójny charakter systemu rzeczowego, jako produktu i środka produkcji, to widać, że konsumpcja może być przedstawiona również jako dalszy stopień produkcji. Każdy z tych trzech systemów reprezentuje więc określony typ w makrosystemie socjotechnicznym i konkretyzuje się w doświadczeniowej rzeczywistości w setkach, tysiącach czy milionach realnych organizacji.

Każdy z tych mezosystemów zawiera po trzy podsystemy: system celów, system informacyjny i system wykonawczy. Za pomocą tych klocków dają się przejrzeć zrekonstruować różne makroteorie: Według teorii *nacisku podaży* (*supply push*) w systemach informacyjnych badań i rozwoju tworzone są potencjały techniczne i oferowane są systemy produkcyjne, które robią z tego innowacje. Przez reklamę i przez podaż wykonanych produktów innowacje przedstawiane są systemom użytkowania, aby je rozwinąć w odpowiadającą potrzebę i nowe zapotrzebowanie uczynić jako podaż.



Rys. 45. Model rozwoju technicznego

Według teorii *ssania popytu* (*demand pull*) w systemie celów konsumpcji występują nowe potrzeby, które artykułowane są w stosunku do systemów produkcji jako zapotrzebowanie. Jeżeli odpowiednie potencjały są już gotowe, to producent szybko zareaguje odpowiednimi wynalazkami i innowacjami; w innym razie będzie on o zapotrzebowaniu na nowe potencjały powiadamiał organizacje badawcze i rozwojowe, aby wyzwolić tam procesy poszukiwawcze, za których pomocą zostanie uzyskana potrzebna nowa wiedza. Jeżeli poszukiwanie jest skuteczne, to powstaje wynalazek albo już w badaniach i rozwoju lub w systemie produkcji, gdzie jest on następnie przeprowadzany w innowację. W schemacie na rysunku przedstawiona jest również teoria *imperatywu wykorzystania kapitału* (*Imperativ der Kapitalverwertung*), a mianowicie w taki sposób, że systemowi celów systemu produkcyjnego daje się szczególną wartość, a uzyskanie zysku podkreślane jest jako dominujące kryterium decyzyjne.

W ten sposób można te trzy teorie określić za pomocą funkcji mezosystemów i wzajemnych stosunków między mezosystemami, które ze swej strony wchodzą w makropoziom. Jeżeli model ten bardziej różnicuje się i dla każdego rodzaju mezosystemu przewidzi się po wiele empirycznych systemów działaniowych, to można również zrozumieć jak różne pojedyncze przypadki rozwoju wielu aktorów

wzajemnie ograniczają się i jak mogą wzajemnie na siebie wpływać. Nie wolno zapominać, że mezosystemy w interpretacji empirycznej składają się z indywidualnych osób.

Przez rozwój techniczny РОПОHL rozumie z jednej strony ontogenezę poszczególnych systemów rzeczowych, a z drugiej filogenezę technosfery; przy tym filogeneza jest dynamicznym systemem ontogenez. W filogenezie ujawnia się zręczność techniki, którą próbuje się strukturyzować za pomocą różnych propozycji periodyzacji. Ontogeneza daje się podzielić na fazy kognicji, inwencji, innowacji i dyfuzji. Inwencja lub wynalazek jest właściwym źródłem nowości technicznej. Polega ona w zasadzie na rozpoznaniu potencjału naukowego lub technicznego i porównaniu go z ludzką koncepcją użytkowania; skutkiem wynalazku jest pomysł na użytkowanie. Dokładnie w tym leży fundamentalna różnica między poznaniem naukowym i wynalazkiem technicznym, i dlatego nie ma żadnego automatyzmu, który przeprowadzałby poznanie naukowe samo z siebie w zastosowanie techniczne.

Różne teorie objaśniające rozwój techniczny przyporządkowuje РОПОHL wprowadzonym społecznym poziomom hierarchii. Mikroteorie badają indywidualną działalność wynalazczą i innowacyjną; występują one w wariantach intuicjonistycznych i racjonalistycznych i pomijają społeczne siły kształtujące. Makroteorie rozważają czynniki socjoekonomiczne, które w całościowo społecznym splocie wywołują innowację na mezopoziomie przedsiębiorstw przemysłowych. Omawiając teorie nacisku podaży, ssania popytu, imperatywu wykorzystania kapitału oraz teorię konstrukcji społecznej; РОПОHL krytykuje, że te teorie jednoczynnikowe, tak jak mikro-teorie, zawsze są w stanie objaśnić tylko zjawiska cząstkowe rozwoju technicznego. Dlatego rozwija wieloczynnikowy, hierarchiczny model trójpoziomowy, który zawiera wszystkie te podejścia teoretyczne i wzajemnie je łączy. Z tego wynika wiązka hipotez, które wprawdzie objaśniają rozwój techniczny ex post, ale nie pozwalają prognozować z góry. Mimo wszystko za pomocą tego modelu można określić punkty zaczepienia dla regulujących ingerencji w rozwój techniczny. Dynamika rozwoju technicznego nie podlega żadnej tajemniczej prawidłowości własnej, lecz całkowicie określonym procesom stanowienia celów i podejmowania decyzji, które to procesy, gdy staną się przejrzyste, mogą być również poddane demokratycznej kontroli.

Opis matematyczny

System

(1.1) System Σ jest modelem składającym się z kwadrupla¹¹ zbiorów, zbioru atrybutów α , zbioru funkcji φ , zbioru części κ i zbioru relacji π .

$$\Sigma = (\alpha, \varphi, \kappa, \pi)$$

¹¹ Kwadrupel jest uporządkowanym czterocyfrowym wyrażeniem matematycznym; uporządkowane dwucyfrowe wyrażenie nazywa się parą.

Kwadrupel Σ składa się z dwóch par, z których każda jest tworem relacji, a więc przedstawia zbiór elementów i zbiór relacji o elementach.

(1.2) Pierwsza para opisuje *system funkcjonalny* ΣF z atrybutami a_j i relacjami między atrybutami, czyli funkcjami f_q .

$$\Sigma F = (\alpha, \varphi) \text{ z } \alpha = \{a_j\} \text{ i } \varphi = \{f_q\}; \quad f_q \subset X_{a_j}; \quad j \text{ i } q = 1 \dots n$$

(1.3) Druga para opisuje *system strukturalny* ΣS z częściami k_j i relacjami p_q między częściami systemu.

$$\Sigma S = (\kappa, \pi) \text{ z } \kappa = \{k_j\} \text{ i } \pi = \{p_q\}; \quad p_q \subset X_{k_j}; \quad j \text{ i } q = 1 \dots n$$

(1.4) System Σ może być opisany jako część k_j^+ *nadsystemu* Σ^+ .

$$\Sigma \subset \Sigma^+ = (\alpha^+, \varphi^+, \kappa^+, \pi^+)$$

(1.5) Część k_j systemu Σ może być opisana jako *podsystem* Σ' .

$$\Sigma \supset \Sigma' = (\alpha', \varphi', \kappa', \pi')$$

(1.6) Z (1.1), (1.4) i (1.5) można jako ciąg systemów zdefiniować *hierarchię systemu* ΣH .

$$\Sigma H = (\dots, \Sigma^+, \Sigma, \Sigma', \dots)$$

Dla właściwej hierarchii obowiązuje $\Sigma' = k_j \in \kappa$ i $\Sigma = k_j^+ \in \kappa^+$; można jednak definiować hierarchie niewłaściwe, gdy przyjmie się na przykład $\Sigma' = \{k_q\} \subset \kappa$. W modelu hierarchia jest otwarta w górę i w dół; w układach empirycznych istnieje górna i dolna granica.

(1.7) Niech $\Omega \supset \Sigma$ będzie zbiorem wszystkich elementów (Allmenge) pola badań; wtedy otoczenie Γ jest tym zbiorem częściowym zbioru wszystkich elementów, który nie jest systemem.

$$\Gamma = \Omega \setminus \Sigma$$

Ponieważ zbiór wszystkich elementów nie daje się określić całkowicie, można w przypadku (1.7) zamiast Ω podstawić nadsystem Σ^+ ; wtedy otoczenie systemu jest częścią nadsystemu, który sam do systemu nie należy.

Za pomocą tych definicji trzy podstawowe koncepcje systemu – funkcjonalna, strukturalna i hierarchiczna – są współzależnie jednolicie opisane stosownie do rysunku 46. Szczególne teorie możemy odgraniczyć wtedy, gdy skoncentrujemy się na (1.2), (1.3) lub (1.6) i wprowadzimy dalsze uszczególnienia. Najpierw zrobimy to dla funkcjonalnej koncepcji systemu.

(1.8) Niech $X \in \alpha$, $Y \in \alpha$ i $Z \in \alpha$ będą elementami zbioru atrybutów α i niech $\gamma \in \Sigma$ będzie dowolnym atrybutem otoczenia systemu Σ . Wtedy X jest *wejściem* (input), gdy w relacji między otoczeniem a systemem $\gamma \times X$ stoi ono jako człón następný. Odpowiednio Y jest *wyjściem* (output), gdy w relacji między systemem a otoczeniem $Y \times \gamma$ stoi ono jako człón poprzedni. Z jest stanem, gdy nie stoi ono w żadnej relacji z γ .

(1.9) Funkcja między wejściami nazywa się *funkcją wejściową* f_x , między wyjściami *funkcją wyjściową* f_y , a między stanami *funkcją stanową* f_z .

$$f_x \subset X \times X; \quad f_y \subset Y \times Y; \quad f_z \subset Z \times Z$$

(1.10) System zdefiniowany tylko przez stany i funkcje stanowe nazywa się *dyskretnym systemem stanowym* ΣZ .

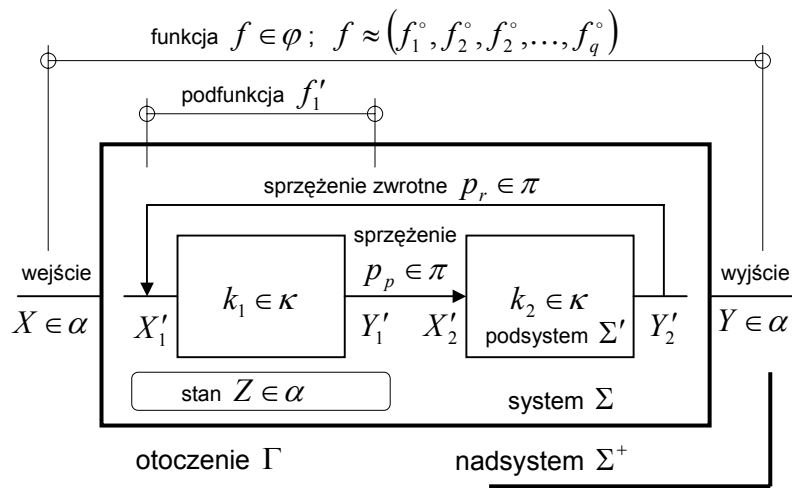
$$\Sigma Z = (\alpha, \varphi) \text{ z } \alpha = Z \text{ i } \varphi = f_z$$

(1.11) Funkcja między wejściami i stanami nazywa się *funkcją przeprowadzenia* (Überföhrunhsfunktion) f_{ue} , funkcja między wejściami i wyjściami *funkcją wyniku* (Ergebnisfunktion) f_e , funkcja między stanami i wyjściami *funkcją cechowania* (Markierungsfunktion) f_m .

$$f_p \subset X \times Z; \quad f_w \subset X \times Y; \quad f_c \subset Z \times Y$$

(1.12) System zdefiniowany tylko przez atrybuty z (1.8) i funkcje z (1.11) nazywa się *automatem dyskretnym* ΣA .

$$\Sigma A = (\alpha, \varphi) \text{ z } \alpha = \{X, Y, Z\} \text{ i } \varphi = \{f_p, f_w, f_c\}$$



Rys. 46. Podstawowe pojęcia teorii systemów

(1.13). System funkcjonalny, którego funkcje zawierają czas $T \in \alpha$, nazywa się *systemem funkcjonalnie dynamicznym*. Jeżeli obowiązuje $T \sim \mathfrak{R}$ i dla charakterystycznych atrybutów $a_j \subset \mathfrak{R}^{12}$, to system nazywa się również systemem ciągłym i może być wtedy rozważany za pomocą środków analizy matematycznej.

$\Sigma FD = (\alpha, \varphi)$ z $f_q = f_q(T)$, szczególnie dla f_x, f_y, f_z, f_p, f_w i f_c

(1.14) Ciąg funkcji cząstkowych f_q° , równoważny z funkcją f , nazywa się *rozkładem funkcji*.

$$f_q^\circ \sim (f_1^\circ, f_2^\circ, f_3^\circ, \dots, f_q^\circ, \dots)$$

Rozkład funkcji jest heurystycznym środkiem do analizy lub syntezy struktury systemu, gdy się przyjmie, że każdej funkcji cząstkowej f_q° odpowiada (lub powinien odpowiadać) podsystem $k_j = \Sigma'$, który spełnia wymienioną podfunkcję $f_q' = f_q^\circ$. Również dla strukturalnej koncepcji systemu istnieją specyficzne cechy własne, z których niektóre tu wymienimy.

(1.15) System definiowany tylko przez tego samego rodzaju elementy k (węzły) i tego samego rodzaju powiązania p między elementami (brzegi), nazywa się *grafem ΣG* .

$$\Sigma G = (\kappa, \pi) \text{ dla } \kappa = \{k\} \text{ i } \pi = \{p_c\}$$

¹² \mathfrak{R} oznacza zbiór liczb rzeczywistych

(1.16) Systemy strukturalne charakteryzuje się przez liczbę j ich części, czyli różnorodność V , oraz przez liczbę q ich relacji, czyli złożoność C . Używa się przy tym albo samej wielkości liczbowej albo jej logarytmu dwójkowego. Jeżeli interpretuje się części jako liczby, to różnorodność nazywana jest również (syntaktyczną) informacją I i ma, przy równym rozkładzie częstotliwości znaków k_j , sumę H

$$H = \text{ld } j \text{ [bitów]}.$$

(1.17) Bezwzględna wartość liczbową maksymalnej złożoności C_{\max} wynosi

$$C_{\max} = j \cdot (j - 1).$$

(1.18) Relacja między dwoma podsystemami k_1 i k_2 (lub Σ_1' i Σ_2') nazywa się sprzężeniem p_p , gdy wyjście Y_1' od k_1 stanie się wejściem X_2' od k_2 .

$$p_p = (Y_1', X_2') \text{ z } X_2' = Y_1'$$

(1.19) Relacja między dwoma podsystemami k_1 i k_2 (lub Σ_1' i Σ_2'), sprzężonymi według (1.18) nazywa się sprzężeniem zwrotnym p_r , gdy wyjście Y_2' drugiego stanie się wejściem X_1' pierwszego podsystemu.

$$p_r = (Y_2', X_1') \text{ z } X_1' = Y_2'$$

(1.20) System strukturalny, zawierający dodatkowo atrybut czasowy T , od którego zależą części systemu k_j lub relacje p_q nazywa się systemem strukturalnie dynamicznym; zbiór relacji zależnych o czasie nazywa się strukturą przebiegu.

$$\Sigma SD = (T, \kappa, \pi) \text{ z } k_j = k_j(T) \text{ i } p_q = p_q(T)$$

(1.21) Jeżeli dla strukturalnie dynamicznego systemu ΣSD_1 w chwili t_1 i dla strukturalnie dynamicznego systemu ΣSD_2 w chwili t_2 ma miejsce sytuacja, że ΣSD_1 jest zawarty w ΣSD_2 , ale nie jest z nim identyczny, szczególnie gdy różnorodność $V_2 > V_1$ albo złożoność $C_2 > C_1$, to system nazywa się systemem samoorganizującym lub autopoetycznym.

Do tej pory wprowadziliśmy jedynie definicje. Teraz spróbujemy sformułować elementarne zasady systemowe. I tak: z (1.1) i (1.3) wynika bezpośrednio znana zasada holistyczna, nazwana niewyraźnie już przez ARYSTOTELESA.

(1.22) System jest czymś więcej niż zbiorem swoich części, ponieważ szczególny charakter systemu określają dopiero relacje między częściami (*zasada holistyczna*).

$$\forall \Sigma : \Sigma \supset \kappa; \quad \Sigma \setminus \kappa = \emptyset$$

(1.23) Struktura systemu określa jego funkcje (*zasada określoności funkcjonalnej*).

$$\forall \Sigma : \Sigma S \rightarrow \Sigma F$$

(1.24) Z podanej funkcji nie można wnioskować o strukturze; konkretna funkcja systemu może być wytwarzana przez różne struktury ΣS_j (*zasada ekwifunkcjonalności*).

$$\forall \Sigma : \neg(\Sigma F \rightarrow \Sigma S), \text{ bo } \exists(\Sigma S_1, \Sigma S_2, \Sigma S_3, \dots), \text{ a więc } \forall \Sigma S_j : (\Sigma S_j \rightarrow \Sigma F)$$

Dlatego również dla każdej funkcji f_q możliwych jest wiele rozkładów funkcji, zgodnie z (1.14). W końcu z definicji (1.4) do (1.6) wynika, że:

(1.25). System nie może być w pełni opisany na jednym, jedynym poziomie hierarchii (*zasada wykluczonego redukcjonizmu*).

$$\forall \Sigma : \Sigma \Rightarrow (\Sigma^+, \Sigma')$$

System działaniowy

(2.1) System według definicji (1.1) nazywa się *systemem działaniowym* G wtedy, gdy G lub jego części $k_j \in K$ przedstawiają nośnik działania, a jego funkcje $f_q \in F$ przedstawiają działania.

$$G = (A, F, K, P) \text{ dla } A \approx \alpha, F \approx \varphi, K \approx \kappa, P \approx \pi$$

(2.2) Zbiór A atrybutów składa się, zgodnie z (1.8), ze zbiorów cząstkowych X atrybutów wejścia, zbiorów cząstkowych Y atrybutów wyjścia i ze zbiorów cząstkowych Z atrybutów stanu.

$$A = X \cup Y \cup Z \text{ dla } X_j \in X, Y_j \in Y \text{ i } Z_j \in Z$$

(2.3) Każdy zbiór cząstkowy z (2.2) zawiera atrybuty masy M , atrybuty energii E , atrybuty informacji I , atrybuty przestrzeni R i atrybuty czasu T .

$$X = X_M \cup X_E \cup X_I \cup X_R \cup X_Z \text{ i analogicznie dla } Y \text{ i } Z$$

(2.4) System działaniowy ma co najmniej jeden cel ZL , który należy do zbioru informacyjnych atrybutów stanu Z_I .

$$\forall G : ZL \in Z_I \subset Z \subset A$$

(2.5) System działaniowy G i jego otoczenie Γ tworzą *sytuację* S .

$$S = G \cup \Gamma$$

Działanie jest funkcją $f_q \in F$ systemu działaniowego. Polega ono na transformacji sytuacji S zgodnie z celem $ZL \in Z$. Ogólnie biorąc obowiązuje:

$$f_q \subset ZL \times S \times S$$

Dla S_1 jako sytuacji początkowej i S_2 jako sytuacji końcowej można również napisać:

$$f_q : (ZL, S_1) \rightarrow S_2 \text{ dla } S_2 \approx ZL!$$

Ponieważ sytuacja końcowa S_2 powinna być równoważna pierwotnemu celowi ZL , musi być rozumiana jako żądanie, które w rzeczywistości nie zawsze daje się spełnić.

(2.7) Funkcja działaniowa f_Z zgodnie z (1.9), zdefiniowana wyłącznie dla stanów $Z \subset A$ systemu działaniowego, nazywa się *działaniem wewnętrznym*.

$$f_Z : (ZL, Z) \rightarrow Z$$

(2.8) Funkcja działaniowa f_e zgodnie z (1.11), zdefiniowana dla wejść $X \subset A$ i wyjść $Y \subset A$, nazywa się *działaniem zewnętrznym*.

$$f_e : (ZL, X) \rightarrow Y$$

Funkcje działaniowe f_x i f_y zgodnie z (1.9), oraz f_{ue} i f_m zgodnie z (1.11), są szczególnymi przypadkami działania zewnętrznego. W poniższych definicjach w centrum stoi funkcja działaniowa f_e ; zachowując sens można ją jednak przenieść również na przypadki szczególne.

(2.9) Funkcję działaniową f_e można, zgodnie z (1.14), rozłożyć w ciąg funkcji cząstkowych: *funkcję ustalania celów* f_{ZS}° , *funkcję informacyjną* f_{IS}° i *funkcję wykonawczą* f_{AS}° .

$$f_e \approx (f_{ZS}^\circ, f_{IS}^\circ, f_{AS}^\circ)$$

(2.10) Jako abstrakcyjne nośniki funkcji cząstkowych z (2.9) można postulować systemy cząstkowe k° , *system ustalania celów* ZS° , *system informacyjny* IS° i *system wykonawczy* AS° (porównaj rysunek 13).

$$\{k^\circ\} = ZS^\circ \cup IS^\circ \cup AS^\circ$$

(2.11) Analogicznie do (2.9) można również funkcje cząstkowe f_{IS}° i f_{AS}° rozłożyć dalej na funkcje cząstkowe $f_{IS}^{\circ\circ}$ i $f_{AS}^{\circ\circ}$ i postulować dla nich systemy cząstkowe $k^{\circ\circ}$:

dla systemu informacyjnego IS° szczególnie *system receptorowy* $IS_R^{\circ\circ}$, *system efektorowy* $IS_E^{\circ\circ}$, *system przetwarzania* $IS_V^{\circ\circ}$ i *system magazynowania (pamiętania)* $IS_S^{\circ\circ}$;

dla systemu wykonawczego AS° szczególnie *system pobierania* $AS_R^{\circ\circ}$, *system wydawania* $AS_E^{\circ\circ}$, *system manipulowania* $AS_H^{\circ\circ}$, *system przetwarzania energii* $AS_N^{\circ\circ}$, *system oddziaływania* $AS_W^{\circ\circ}$ i *system kierowania* $AS_F^{\circ\circ}$ (porównaj rys. 7).

$$IS^\circ = IS_R^{\circ\circ} \cup IS_E^{\circ\circ} \cup IS_V^{\circ\circ} \cup IS_S^{\circ\circ}$$

$$AS^\circ = AS_R^{\circ\circ} \cup AS_H^{\circ\circ} \cup AS_V^{\circ\circ} \cup AS_N^{\circ\circ} \cup AS_W^{\circ\circ} \cup AS_F^{\circ\circ}$$

Ludzki system działaniowy

(3.1) *Hierarchia GH* ludzkich systemów działaniowych w pierwszym przybliżeniu składa się ze społeczeństwa G (*makrosystem społeczny*), podsystemów społecznych G' (*organizacje* i inne *mezosystemy społeczne*) i podsystemów osobowych G'' (*pojedyncze osoby* jako *mikrosystemy społeczne*). Systemy osobowe G'' są w takim samym stopniu elementami w G i w G' ; GH jest hierarchią niewłaściwą.

$$GH = (G, G', G'')$$

W drugim do n -tego przybliżenia można między G'' i G' , między G' i G , jak również powyżej G przyjąć dalsze poziomy hierarchii, szczególnie *megasytem* G^+ jakim jest *społeczność ogólnoswiatowa*.

(3.2) System według (2.1) nazywa się *społecznością* G , gdy atrybuty A , funkcje F , części K i relacje P są zjawiskami społecznymi, to znaczy ponadindywidualnymi.

$$G = (A, F, P, K) \text{ dla } K = \{k_j\} = G_j''$$

(3.3) Zgodnie z (1.5) *podsystem* G' jest zbiorem cząstkowym społeczności G ; zbiór K' jego części G'' jest zbiorem cząstkowym od K .¹³

$$G \supset G' = (A', F', P', K') \text{ dla } K' = \{k_j''\} = \{G''\} \subset K$$

(3.4) *System osobowy* lub *osoba* G'' jest elementem społeczności G lub podsystemu G' .

$$G'' = (A'', F'', P'', K''); \quad G'' \in K \text{ lub } G'' \in K''$$

(3.5) Zbiory funkcji F, F' i F'' obejmują całościowe społeczne (polityczne) działania f_q , działania organizacyjne f_q' lub działania indywidualne f_q'' ; przy tym można rozróżnić rodzaje funkcji według (2.6) do (2.8).

(3.6) Abstrakcyjne systemy cząstkowe k° i $k^{\circ\circ}$ z (2.10) i (2.11) odwzorowuje się na podsystemach i elementach ludzkich systemów działaniowych; z reguły istnieją różne możliwości tego odwzorowania.

$$k^\circ \Rightarrow K; \quad k^\circ \Rightarrow K'; \quad k^\circ \Rightarrow K''; \quad \text{i odpowiednio dla } k^{\circ\circ}$$

System rzeczowy

(4.1) System według (2.1) nazywa się *systemem rzeczowym* S_T , gdy zbiór A_T atrybutów, zbiór F_T funkcji, zbiór K_T części i zbiór P_T relacji przedstawiają zjawiska techniki rzeczowej.

$$S_T = (A_T, F_T, K_T, P_T)$$

¹³ Odmienne od tej definicji w socjologicznych teoriach systemowych podsystem społeczny ujmowany jest zwykle jako zbiór cząstkowy $P^* \subset P$ relacji (interakcji lub komunikacji), bez specyfikowania relatów, a więc tych elementów $k \in K$, których relacje w ogóle dopiero można definiować.

(4.2) Analogicznie do (2.2) i (2.3) *zbiór atrybutów* A_T obejmuje wejścia X , wyjścia Y i stany X następujących kategorii: masa M , energia E , informacja I , przestrzeń R i czas T .

(4.3) *Zbiór funkcji* F_T obejmuje funkcje F_{tx} , F_{ty} i F_{tz} , zgodnie z (1.9), jak również funkcje F_{tue} , F_{te} i F_{tm} , zgodnie z (1.11).

(4.4) Funkcję wynikową f_{te} z F_T nazywa się *przemianą* f_w , gdy wyjście Y jest różne od wejścia X .

$$f_w : (X, R_X, T_X) \rightarrow (Y, R_Y, T_Y) \text{ dla } Y \neq X$$

(4.5) Funkcja wynikową f_{te} nazywa się *transportem* f_v , gdy wyjście jest równe wejściu, ale różne są współrzędne przestrzeni i współrzędne czasu.

$$f_v : (X, R_X, T_X) \rightarrow (Y, R_Y, T_Y) \text{ dla } Y = X, R_Y \neq R_X \text{ i } T_Y \neq T_X$$

(4.6) Funkcję wynikową f_{te} nazywa się *magazynowaniem* f_s , gdy między wyjściem a wejściem zmieniają się jedynie współrzędne czasu.

$$f_s : (X, R_X, T_X) \rightarrow (Y, R_Y, T_Y) \text{ dla } Y = X, R_Y = R_X \text{ i } T_Y \neq T_X$$

(4.7) Funkcję przeprowadzenia f_{tue} nazywa się *zmianą stanu* f_c , gdy stan zmienia się wraz ze zmianą wejścia.

$$f_c : (X, Z) \rightarrow Z \text{ dla } Z_2 \neq Z_1$$

System rzeczowy z $f_c \in F_T$ nazywa się *systemem niestacjonarnym*.

(4.8) Funkcję przeprowadzenia f_{tue} nazywa się *zachowaniem stanu* f_h , gdy stan przy zmienionym wejściu pozostaje taki sam.

$$f_h : (X, Z) \rightarrow Z \text{ dla } Z = \text{const}, \text{ pomimo, że } X_1 \neq X_2$$

System rzeczowy z $f_h \in F_T$ nazywa się *systemem stacjonarnym*.

(4.9) Niestacjonarny system rzeczowy zgodnie z (4.7) nazywa się *systemem sterowalnym*, gdy wejście X przedstawia informację rozkazową, a więc gdy $X = X_I$.

(4.10) *Podsystem* $k_i \in K_T$ systemu rzeczowego jest systemem rzeczowym S'_T .

$$k_i = S'_T = (A'_T, F'_T, K'_T, P'_T)$$

(4.11) *Struktura* P_T systemu rzeczowego składa się ze sprzężeń materiałowych, energetycznych i informacyjnych, oraz z relacji przestrzennych i czasowych.

$$P_T = \{p_{pM}\} \cup \{p_{pE}\} \cup \{p_{pI}\} \cup \{p_R\} \cup \{p_T\}$$

Zbiór cząstkowy $\{p_R\}$ nazywa się również *strukturą wytworu*, a zbiór $\{p_T\}$ również *strukturą przebiegu*.

(4.12) Jeżeli otoczenie Γ systemu rzeczowego zgodnie z (1.7) zawiera dalsze systemy rzeczowe S_{Tj} , to mogą one razem z S_T tworzyć *nadsystem* S_T^+ .

$$S_T \subset S_T^+ = (A_T^+, F_T^+, K_T^+, P_T^+)$$

(4.13) Z (4.10) i (4.12) można tworzyć *hierarchię systemu rzeczowego* S_{TH} .

$$S_{TH} = (\dots, S_T^+, S_T, S_T', \dots)$$

System socjotechniczny

(5.1) System działaniowy nazywa się *systemem socjotechnicznym* G_T , G'_T lub G''_T , gdy zbiór F jego funkcji składa się z funkcji ludzkich F_M i z funkcji technizowanych F_T i gdy zbiór K jego części składa się z komponentów ludzkich K_M i komponentów technicznych K_T . Komponenty techniczne K_T są systemami rzeczowymi z hierarchii S_{TH} .

$$G_T = \{A, F_M \cup F_T, K_M \cup K_T, P\} \text{ dla } F_T \approx K_T \subset S_{TH}$$

analogicznie dla G'_T i G''_T

(5.2) Hierarchia G_{TH} systemu socjotechnicznego składa się w pierwszym przybliżeniu ze technizowanej społeczności G_T , technizowanych organizacji G'_T i z technicznie działających ludzi G''_T .

$$G_{TH} = (G_T, G'_T, G''_T)$$

(5.3) Zbiór powstały z przecięcia (iloczynu) zbioru funkcji ludzkich F_M i zbioru funkcji technizowalnych F_T w (5.1) nazywa się *substytucją SUBST*, zbiór powstały z różnicy F_T i F_M nazywa się *komplementacją KOMPL*, a z różnicy z F_M i F_T nazywa się *rezerwacją RESER*.

$$SUBST = F_M \cap F_T; \quad KOMPL = F_T \setminus F_M; \quad RESER = F_M \setminus F_T$$

(5.4) Równoważność funkcji $f_t \in F_T$ systemu rzeczowego z działaniem $f_m \in F_M$ nazywa się *identyfikacją socjotechniczną IDENT*.¹⁴

$$IDENT : f_t \approx f_m$$

(5.5) Gdy zbiór $F_M \cup F_T$ zawiera w sumie q funkcji i gdy z tego j funkcji daje się zidentyfikować socjotechnicznie w F_T , to wynika stąd *stopień stechnizowania θ* .

$$\theta = j / q$$

(5.6) Realizacja systemu rzeczowego S_T dla zidentyfikowanej funkcji f_t nazywa się *ontogenezą techniczną OG_j* .

$$OG_j : f_t \Rightarrow S_T$$

(5.7) Dynamiczny system strukturalny ontogenez $OG_j \subset OG$ i relacji P_{OG} między nimi nazywa się *filogenezą techniczną P_G* .

$$P_G = (T, O_G, P_{OG})$$

System celów

(6.1) System strukturalny zgodnie z (1.3) nazywa się *systemem celów ZL_S* , gdy κ przedstawia zbiór celów ZL a π zbiór relacji celowych p_z .

$$ZL_S = (\{ZL\}, \{p_z\})$$

¹⁴ Związek ten może zostać wytworzony na każdym poziomie hierarchii; należy wtedy odpowiednio zmienić notację

(6.2) Ciąg systemów celowych zgodnie z (6.1) nazywa się *hierarchią celów* ZL_H .

$$ZL_H = (ZL_S^*, \dots, ZL_S^+, ZL'_S, \dots)$$

Element $ZL^* \in ZL_S^*$ najwyższego rangą systemu celów nazywa się *wartością*.

(6.3) Relacja $p_{zd} \in \{p_z\}$ nazywa się *relacją indyferencyjną*, gdy zarówno cel ZL_1 jak i cel ZL_2 są osiągalne¹⁵.

$$p_{zd}(ZL_1, ZL_2) \Leftrightarrow \leftarrow ZL_1 \leftarrow ZL_2$$

(6.4) Relacja $p_{zk} \in \{p_z\}$ nazywa się *relacją konkurencyjną*, gdy osiągalny jest albo cel ZL_1 albo cel ZL_2 .

$$p_{zk}(ZL_1, ZL_2) \Leftrightarrow \leftarrow ZL_1 \mid \leftarrow ZL_2$$

(6.5) Relacja $p_{zp} \in \{p_z\}$ nazywa się *relacją preferencyjną*, gdy osiągalność ZL_1 ma pierwszeństwo przed osiągalnością ZL_2 .¹⁶

$$p_{zp}(ZL_1, ZL_2) \Leftrightarrow \leftarrow ZL_1 ! \leftarrow ZL_2$$

(6.6) Relacja $p_{zm} \in \{p_z\}$ nazywa się *relacją instrumentalną*, gdy osiągalność ZL_1 jest warunkiem osiągalności ZL_2 .

$$p_{zm}(ZL_1, ZL_2) \Leftrightarrow \leftarrow ZL_1 \rightarrow \leftarrow ZL_2$$

W relacji instrumentalnej często ZL_1 nazywa się *środkiem*, a ZL_2 *zamierzonym celem* (Zweck).

(6.7) Ciąg relacji instrumentalnych nazywa się *łańcuchem celów* ZL_K , gdy następny człon w p_{zm1} jest równocześnie poprzedzającym członem w p_{zm2} itd.

$$ZL_K = (p_{zm1}, p_{zm2}, p_{zm3}, \dots) \text{ dla } p_{zm1}(ZL_1, ZL_2), p_{zm2}(ZL_2, ZL_3) \text{ itd.}$$

¹⁵ Tu i dalej operator \leftarrow oznacza „osiągalny”

¹⁶ Operator $!$ oznacza „ma pierwszeństwo”

4. Modele systemowe mechatroniki

Formalny systemowy model techniki, zaproponowany przez G. ROPOHLA i przedstawiony w poprzednim rozdziale, chciałbym teraz wypełnić treścią mechatroniczną. Techniki mechatronicznej nie można zrozumieć bez działań człowieka. Słowa, jak „działalność”, „działanie”, „praca”, występują jawnie bądź niejawnie w prawie każdej definicji techniki. Z fizykalnego punktu widzenia dzisiejsza technika staje się techniką mechatroniczną. Dlatego teoria działania niejako automatycznie nasuwa się jako materialna teoria dla interpretacji systemowego modelu mechatroniki.

Konkretyzacji modelu ROPOHLA na obszar mechatroniki chcę dokonać w dwóch etapach. Najpierw rozwinę ogólny model mechatronicznego systemu działaniowego. Następnie w kolejnych punktach tego rozdziału abstrakcyjny mechatroniczny system działaniowy zinterpretuję empirycznie w taki sposób, aby uzyskane modele mogły być identyfikowane z działającymi instancjami rzeczywistości doświadczalnej, czyli z urządzeniami mechatronicznymi.

Mechatroniczny system działaniowy

Działanie a mechatronika

Koncepcja działania odgrywa centralną rolę w naukach humanistycznych i społecznych. Szczególnie przyczyniła się do tego antropologia filozoficzna. Filozofia techniki upowszechniła pojęcie działania technicznego. Podkreśla ona przy tym, że technika obejmuje nie tylko zbiór sztucznie wytworzonych przedmiotów, lecz przede wszystkim ludzkie działanie, które te przedmioty wytwarza i użytkuje. Pojęcie działania jest więc wystarczająco szerokie, aby móc je wykorzystać dla koncepcji teoretycznej, która będzie spójna z podstawowymi założeniami antropologii, socjologii i filozofii techniki.

Przyjęło się rozróżniać działanie społeczne od działania technicznego. To analityczne rozróżnienie na pierwszy rzut oka wydaje się być użyteczne. Jako *działanie techniczne* można scharakteryzować wtedy obchodzenie się ze sztucznie wytworzonymi przedmiotami, natomiast jako *działanie społeczne* – obchodzenie się z innymi ludźmi. Pierwsze można utożsamiać z wytwarzaniem, drugie zaś z komunikacją. Jednak w społeczności, w której panuje podział pracy, bez komunikacji nie jest możliwe żadne wytwarzanie. Ponadto przedmioty wytworzone w ogromnej większości wchodzi w sferę działania innych ludzi i łączą się tam bardzo często z czynnościami, które ukierunkowane są na sytuację życiową człowieka. Dotyczy to przede wszystkim urządzeń mechatronicznych, takich jak twarde dyski w komputerach, roboty, rozruszniki serca, protezy czy urządzenia bezpieczeństwa w samochodach (poduszki, ABS, ASR, ESP, VDC). Jak to wykazał ROPOHL w swej systemowej teorii techniki, i co pokażę w kolejnych rozdziałach tej książki, działa-

nie techniczne, działanie gospodarcze i działanie społeczne w rzeczywistości wielokrotnie przeplata się.

Model mechatronicznego systemu działaniowego powinien być więc uniwersalny, aby można w nim było odwzorować działanie zarówno techniczne jak i społeczne, zarówno pracę jak i interakcję. Taki model zaproponował РОПОHL. Oparł się na ogólnej definicji działania zaproponowanej przez von KEMPSKIEGO: „Działanie jest transformacją jednej sytuacji w drugą. To przekształcenie sytuacji następuje według pewnej maksymy i w przypadku idealnym w taki sposób, że wraz z sytuacją wyjściową i z maksymą działającego podmiotu ustalona jest sytuacja końcowa.” Takie pojęcie działania chcę teraz sprecyzować i pogłębić w odniesieniu do techniki mechatronicznej. W tym celu rozwinę teorisystemowy model opisowy mechatronicznego systemu działaniowego.

Pojęcie mechatronicznego systemu działaniowego i jego funkcje

Wyrażenie „system działaniowy” można rozumieć dwojako: (1) jako „system działań” lub (2) jako „system, który działa”. Pierwsze rozumienie znajdujemy przede wszystkim w socjologicznych teoriach systemowych, zwykle abstrahujących od osób, które działają; chodzi tu o zebranie w jedną całość na przykład wszystkich działań gospodarczych, obojętnie przez kogo podejmowanych i wykonywanych, w „system ekonomiczny”. Taka interpretacja, formalnie dopuszczalna, ma jednak poważną wadę: taki system jest prawie niemożliwy do zidentyfikowania w rzeczywistości doświadczalnej.

Dlatego lepsze jest rozumienie drugie: *System działaniowy* jest instancją, która realizuje działanie. Wtedy jako systemy działaniowe można opisywać rzeczywistych ludzi, rzeczywiste organizacje a także, jak to się okaże, urządzenia techniczne oraz rozpoznawać w nich podłoża empiryczne odwzorowywane za pomocą modelu systemowego. Ogólny system działaniowy jest modelem teoretycznym, który może odwzorowywać dowolny empiryczny nośnik działania. System działaniowy nie jest więc czymś w rodzaju zbioru działań, lecz pewnym nośnikiem działania. W nowoczesnej technice takim nośnikiem działania, obok człowieka, staje się mechatronika. Jest ona bowiem głównym powodem tego, że działania techniczne coraz bardziej zastępują działania człowieka, i to takie, które jeszcze niedawno wydawały się nie do zastąpienia.

Jeśli nośnik działania nazywam mechatronicznym systemem działaniowym, to podporządkowuję go ogólnemu modelowi systemowemu. Mechatroniczny system działaniowy ma więc funkcje, strukturę i otoczenie. Do systemu działaniowego należy wszystko, czego potrzeba, aby działanie w ogóle doszło do skutku. *Otoczenie* obejmuje te wszystkie stany i fakty, z którymi mechatroniczny system działaniowy pozostaje lub może pozostawać w jakimś związku; stany i fakty mogą być zjawiskami przyrodniczymi, technicznymi lub społecznymi.

Mechatroniczny system działaniowy i jego otoczenie tworzą razem *sytuację mechatroniczną*. Definicja ta może wydawać się trochę dziwna. Jest ona jednak wymagana, aby wybranym tu pojęciem działania mechatronicznego można było pokryć wszystkie zdarzające się jego typy. Jeśli przez sytuację mechatroniczną rozumieli-

byśmy tylko stan otoczenia, to działanie, w którym system działaniowy odnosi się sam do siebie, nie mogłoby być nazwane „transformacją sytuacji”. W istocie również von KEMPSKI opisuje sytuację jako „powiązanie relacji między osobami i przedmiotami”, a więc włącza działający podmiot w pojęcie sytuacji. Jeśli jednak odwzoruje się również otoczenie w modelu systemu, to sytuację można scharakteryzować jako supersystem, który, jako części składowe, zawiera określone systemy otoczeniowe i system działaniowy.

Formalnie system działaniowy będziemy nazywać *systemem mechatronicznym*, jeśli podstawowym jego atrybutem jest mechatronika. Powstaje tu jednak pewien problem. Mechatronika jest bowiem atrybutem jednoznacznie rzeczowym. Ponieważ jednak umożliwia coraz szersze zastępowanie podstawowych funkcji działaniowych człowieka, ma więc aspekt działaniowy. Oznacza to, że mechatronika jak byśmy powiedzieli „urzeczawia” (uprzedmiotawia) działania ludzkie, nie tylko proste, powtarzalne czynności fizyczne, ale również te bardziej złożone, nazywane tradycyjnie umysłowymi, jak na przykład wnioskowanie logiczne i związane z tym podejmowanie decyzji. Mechatronika nie tylko wspomaga działania ludzkie, ale również potrafi je całkowicie zastępować, a nawet rozszerzać i uzupełniać. I tak mechatroniczny, sensoryczno-aktoryczny, akt „postrzeganie-działanie” jest często znacznie szybszy i pewniejszy niż sensomotoryczny akt „postrzeganie-działanie” u człowieka. Pokazuje to jednoznacznie przykład hamulca mechatronicznego. Możemy powiedzieć więc, że następuje substytucja mechatroniczna; zastąpienie działań ludzkich przez działania mechatroniczne. Taka substytucja jest zasadą mechatronizacji, która staje się dziś najważniejszą zasadą technizacji. W ten sposób dochodzimy do ogólnej funkcji mechatronicznego systemu działaniowego, którą jest *zastępowanie i uzupełnianie funkcji działaniowych człowieka*.

Zasadę *substytucji mechatronicznej* można opisać następująco: Podczas planowania działań i czynności człowieka zauważa się, że istnieje działanie cząstkowe lub czynność, która może być wykonana przez rzecz. Oznacza to, że czynność ta jest równoważna z funkcją tej rzeczy, w naszym przypadku urządzenia mechatronicznego. W ten sposób powstaje mechatroniczny system socjotechniczny. W systemie tym rozpatrywane działanie przemieszcza się więc z ludzkich nośników funkcji do technicznych nośników funkcji. Wraz z tym następuje substytucyjna integracja. Określone podsystemy systemu działań nie są już dalej organami człowieka czy bytami społecznymi, lecz wytworami techniki mechatronicznej. Najlepszym przykładem wydają się tu centralne urządzenia mechatroniczne, czyli roboty. Powstanie i rozwój mechatroniki spowodowały, że robot nie jest narzędziem, lecz, podobnie jak człowiek, podmiotem używającym narzędzi.

Podczas takiej integracji wytwarzane są relacje socjotechniczne, a więc powiązania między ludzkimi i mechatronicznymi nośnikami funkcji. Funkcja całkowita zostaje zachowana, ale struktura systemu działań przyjmuje nową jakość. W takim opisie przydatność ujęcia systemowego dla zrozumienia techniki mechatronicznej jest szczególnie widoczna: Ponieważ jeden i ten sam model umożliwia ujęcie zarówno systemów społecznych jak i technicznych, może także odwzorować integrację tych różnych typów systemów i przez to pozwolić uchwycić tę szczególną jakość mechatronicznych systemów socjotechnicznych, która mogłaby ująć uwagę

wyzolowanemu spojrzeniu nauk społecznych czy wyizolowanemu spojrzeniu nauk technicznych.

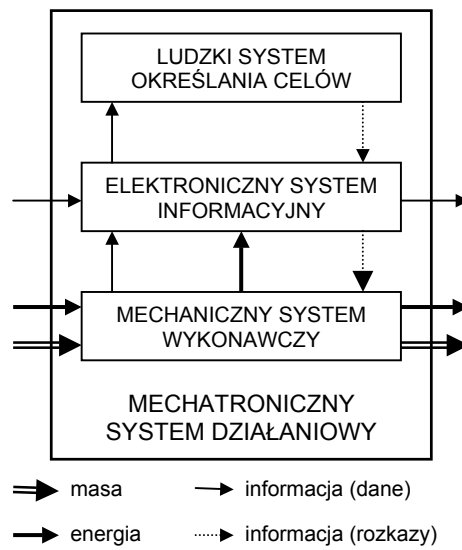
Inaczej ma się sprawa, gdy urządzenie mechatroniczne integrowane jest według zasady *komplementacji*. Wówczas ma ono funkcję niemożliwą do spełnienia przez człowieka, z którego systemem działaniowym wchodzi w powiązanie. W komplementacji mechatronicznej mamy do czynienia z funkcją mechatroniczną, której w ludzkim systemie działań nie odpowiada nic porównywalnego. Urządzenia do wytwarzania mikroprocesorów czy twardych dysków, mikro- i nanourządzenia spełniają funkcje, które nie mogłyby być realizowane inaczej niż za pomocą funkcji mechatronicznej.

Obie zasady integracji należy traktować oczywiście jako typy idealne, bo nie zawsze występują w czystej formie. Czysta substytucja występuje bardzo rzadko, najczęściej w medycynie, gdzie urządzenia mechatroniczne mogą przyjmować postać sztucznych organów w miejsce naturalnych nośników funkcji. Ale czy wszystkie funkcje działaniowe człowieka mogą być mechatronizowane? A nawet jeżeli mogą, to czy muszą?

Struktura mechatronicznego systemu działaniowego

Przechodząc od rozważań funkcjonalnych do strukturalnych muszę pierwotną „czarną skrzynkę” uczynić przejrzystą i określić jej wewnętrzne składniki i relacje. Pozostanę przy tym nadal na ogólnym poziomie modelu. Podsystemy tu opisywane są najpierw tylko konstruktami teoretycznymi, które należy określić tylko jako nośniki funkcji cząstkowych. Taki proces interpretacji nie daje się wyprowadzić automatycznie. Rozkład funkcji systemowej na funkcje cząstkowe może nastąpić, ogólnie biorąc, według wielu możliwych rozwiązań. Na szczęście w teorii systemów są już przekonujące propozycje rozwiązań, które, abstrahując od detali, wyglądają podobnie do tych na rysunku 17. Z tych propozycji tworzę schematem struktury na rysunku 47 pewną syntezę, która wydaje się szczególnie nadawać w późniejszych rozważaniach.

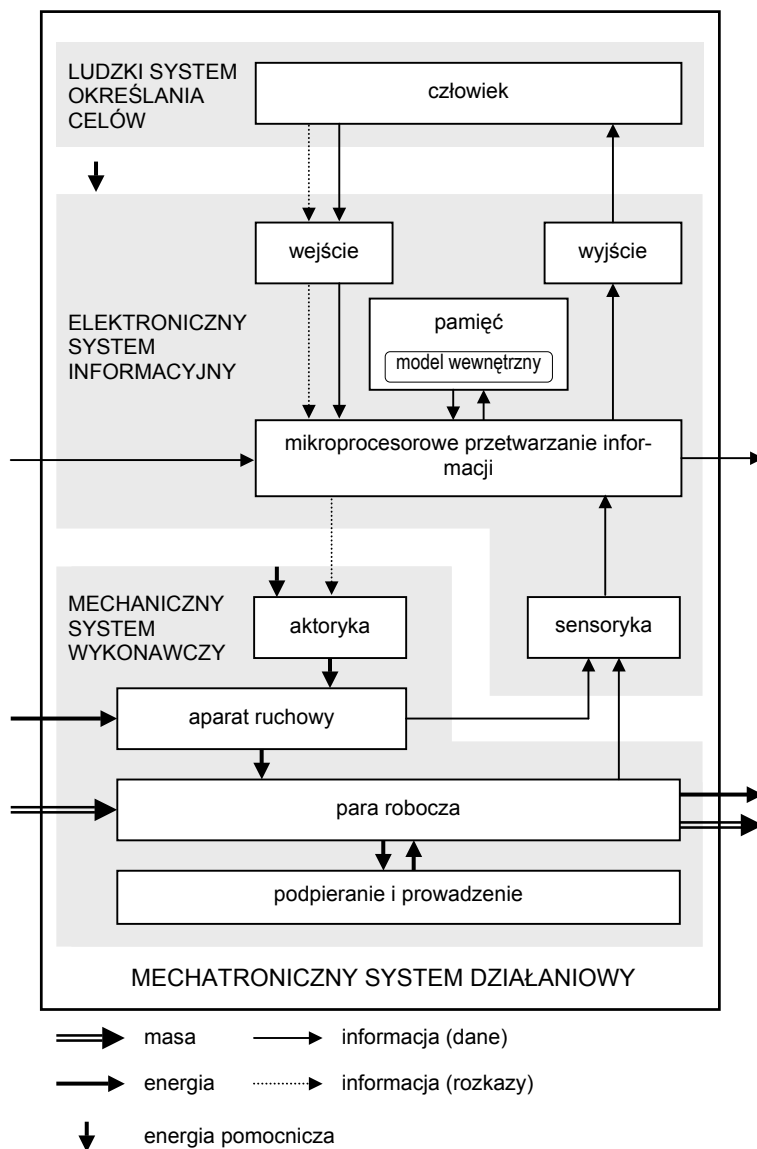
Posługuję się przy tym heurystyczną zasadą analizy struktury. Polega ona na: (1) przyporządkowaniu własnych podsystemów każdej kategorii wejścia, stanu i wyjścia, (2) przyjęciu peryferyjnych podsystemów dla przyjmowania wejścia i wydawania wyjścia i (3) przewidzeniu wewnętrznych podsystemów dla leżących między nimi procesów transformacji. Jak to pokazuje rysunek, można z tego uzyskać najpierw strukturę zgrubną, obejmującą trzy podsystemy. Pierwszym jest *mechaniczny system wykonawczy*, któremu przypadają atrybuty materiałowe i energetyczne; system wykonawczy wykonuje więc pracę w wąskim sensie. Drugim jest *elektroniczny system informacyjny*, mający do czynienia z atrybutami informacyjnymi; tu przebiegają funkcje działaniowe, które informację przyjmują, przetwarzają i wydają dalej, oraz realizują komunikację z innymi systemami działaniowymi. Na koniec mamy system określania celów, który wewnątrz systemu wytwarza cele jako maksymy działania. Na schemacie tym strzałki oznaczają, że cele nie zawsze stawia się dowolnie; zależą one również od informacji, jakie system działaniowy uzyskał o zewnętrznych warunkach otoczenia i o własnych możliwościach działania.



Rys. 47. Zgrubna struktura mechatronicznego systemu działaniowego

Teraz można sprecyzować funkcję informacyjną i funkcję wykonawczą i ponownie postulować instancje cząstkowe, które będą odpowiadać analizowanym funkcjom cząstkowym. W ten sposób powstaje coś w rodzaju teoretycznej hierarchii mechatronicznego systemu działaniowego; systemy cząstkowe z rysunku 47 można wtedy traktować jako podsystemy, a systemy cząstkowe tych podsystemów (rys. 48) jako pod-podsystemy. Rozkład funkcjonalny systemu informacyjnego odpowiada podejściu cybernetycznemu. Za pobieranie informacji z otoczenia i z mechanicznego systemu wykonawczego odpowiada *system sensoryczny*, zwany czasami po prostu sensoryką. Przekazuje on informację do *systemu mikroprocesorowego przetwarzania informacji*, który ocenia i transformuje informację otrzymywaną oraz opracowuje informację nową. Ponieważ porównuje on również istniejący stan otoczenia i kondycję systemu z postawionymi celami i wywodzi z tego nowe polecenia dla systemu wykonawczego, spełnia więc funkcję regulatora.

System mikroprocesorowego przetwarzania informacji przejściowo współpracuje z *systemem zapamiętywania informacji*. Ten ostatni przechowuje informację wcześniej otrzymaną jako „doświadczenie” i przygotowuje ją przez procedury celowe lub skojarzeniowe; system ten zapamiętuje również zdefiniowane cele. Ponieważ wszystkie te informacje są przynajmniej częściowo powiązane w uporządkowane wzorce, można mówić o *modelu wewnętrznym*, który w przybliżeniu odwzorowuje otoczenie systemu i jego stan. Jeżeli system przetwarzania informacji ma wiele możliwości działaniowych, to mogą być one, i ich każdorazowe skutki, najpierw „odegrane” w modelu wewnętrznym. O ile system sensoryczny pracuje selektywnie, o tyle model wewnętrzny wpływa również na wybór spostrzeganych informacji.



Rys. 48. Dokładna struktura mechatronicznego systemu działaniowego

Oprócz tego system informacyjny ma podsystemy wejścia i wyjścia, służące systemowi celów (człowiekowi) do wprowadzania i wydawania informacji. Jest to tak zwany interfejs człowiek-maszyna, którego najbardziej rozpowszechnioną postacią jest dziś klawiatura (wejście) i ekran (wyjście), jak to mamy w komputerze czy telefonie komórkowym.

Podobnie jak system informacyjny również system wykonawczy ma podsystemy peryferyjne, jak wejście masy, wejście energii oraz wyjście masy i wyjście energii. Nie one są jednak najważniejsze i dlatego nie umieściliśmy ich na rysunku. Istotę mechanicznego systemu wykonawczego tworzą cztery podsystemy: (1) roboczy, (2) ruchowy, (3) podpierania i prowadzenia oraz (4) aktoryczny¹⁷. *System roboczy*, często nazywany parą roboczą, wykonuje bezpośrednią przemianę energii lub materiałową zmianę przedmiotów pracy. Pożądane do tego ruchy i siły otrzymuje od *systemu ruchowego* (aparatu ruchowego), który te ruchy wytwarza przez przetwarzanie energii. Aparat ruchowy to tradycyjne układy kinematyczne maszyn lub struktury mechaniczne budowli, budynków, urządzeń instalacji wszelkiego rodzaju; innymi słowy powiązane ze sobą człony kinematyczne z ciała stałego (układy wielociałowe), człony hydrauliczne i pneumatyczne.

Jeżeli system roboczy i/lub system ruchowy zachowują się w niepożądany sposób, o czym systemowi informacyjnemu donosi sensoryka, to zachowania te są korygowane przez *system aktoryczny*, działający bezpośrednio na aparat ruchowy a przez to na parę roboczą. Z elektronicznego systemu informacyjnego aktoryka otrzymuje rozkazy sterownicze mówiące o tym, jak ma zaingerować (nastawić), siłowo bądź ruchowo, w system roboczy. Do tego potrzebna jest jej energia pomocnicza, która zwykle pochodzi z tego samego źródła co energia podstawowa. Energia pomocnicza potrzebna jest również systemowi informacyjnemu; jest ona jednak ilościowo znikoma w porównaniu z energią pomocniczą w aktoryce.

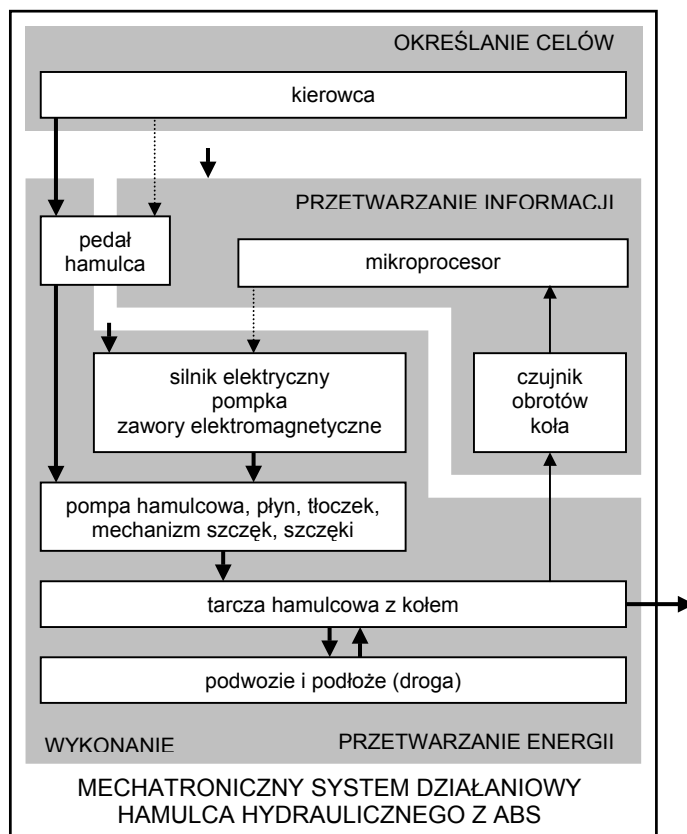
Wreszcie *system podpierania i prowadzenia* zapewnia wszystkim trzem powyższym systemom niezbędne wzajemne ułożenie przestrzenne, podparcie, prowadzenie i zamocowanie oraz przenosi reakcje do otoczenia.

Rysunek 48 uzmysławia jedynie teoretyczny model rozkładu funkcji. Bloki, nazwane podsystemami, nie są rzeczywistymi komponentami, lecz przede wszystkim idealizowanymi abstrakcjami. Ponadto strzałki nie zawsze ukazują czyste sprzężenia, lecz mogą dodatkowo symbolizować funkcje przenoszenia.

Przykład 1: Hamulec hydrauliczny z ABS

Weźmy system działaniowy, jakim jest klasyczny układ hamulcowy w samochodzie wyposażony w ABS (patrz rysunek 5), i zastosujmy do niego strukturę systemu działaniowego z rysunku 47. Układ taki, jak wiemy, składa się z: (1) hamulca cierneho (bębnowego lub tarczowego) napędzanego siłą mięśni nóg kierowcy za pośrednictwem cieczy (płynu hamulcowego) oraz (2) jednostki hydraulicznej wywołującej szybkie pulsowanie ciśnienia tego płynu z chwilą zablokowania hamulca. Ta ostatnia, ogólnie biorąc, składa się z małego silniczka elektrycznego, pompki tłoczkowej, zaworu elektromagnetycznego, czujników zablokowania kół i mikroprocesora. Mikroprocesor otrzymuje informacje-dane płynące z czujników i przetwarza je w odpowiednie informacje-rozkazy dla silnika elektrycznego i zaworu elektromagnetycznego (rys. 49).

¹⁷ Aktor (lub akuator, ang. *actuator*, niem. *Aktor*, franc. *actionneur*) jest elektronicznie sterowanym członem wykonawczym



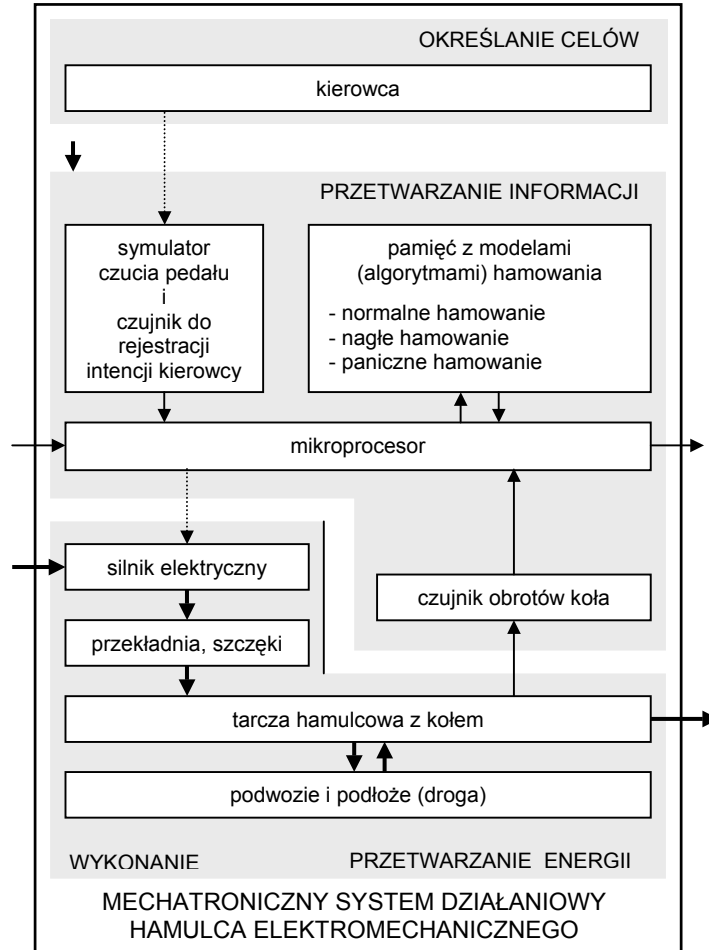
Rys. 49. Struktura mechatronicznego systemu działaniowego hamulca hydraulicznego z systemem usuwania blokady (ABS)

Z perspektywy dokładnej struktury mechatronicznego systemu działaniowego silniczek z pompką i zaworem elektromagnetycznym jest aktorem hydraulicznym sterowanym przez mikroprocesor; czujnik zablokowania koła jest zaś sensorem informującym mikroprocesor o stanie koła (zablokowane/niezablokowane). Pedał hamulca pełni dwie funkcje: informacyjną i energetyczną. Jest wejściem do systemu przetwarzania informacji oraz dostarcza energii do pracy hamulca ciernego. Widać wyraźnie, że strumień energii i strumień sygnału niosącego informację płyną jednym nośnikiem i są wzajemnie fizycznie sprzężone w tym nośniku. Właściwie to sygnałem jest zmiana strumienia energii w czasie. Prowadzi to często do sytuacji, w których strumień przenoszonej energii jest zbyt mały, aby wykonać pracę hamowania stosowną do informacji jaka jest przekazywana tym strumieniem. W efekcie obniża to skuteczność hamowania. Dlatego lepszym rozwiązaniem jest fizyczne rozdzielanie strumienia informacji od strumienia energii, jak to ma miejsce w hamulcu elektromechanicznym (rys. 50).

W strukturze hamulca nie uwzględniliśmy strumienia masy (przetwarzania masy, przetwarzania materiału). Nie oznacza to wcale, że w hamulcu przetwarzanie materiału nie występuje. Objawia się ono przede wszystkim jako zużycie okładzin ciernych w procesie tarcia i jest ważne bardziej z punktu widzenia eksploatacji niż z punktu widzenia funkcji hamulca.

Przykład 2: Elektromechaniczny hamulec mechatroniczny z ABS

W systemie ABS informacja o zamiarze hamowania nie płynie bezpośrednio od kierowcy do mikroprocesora. Jedynym wejściem do mikroprocesora jest wyjście z sensora obrotów kół. Mamy tu sytuację, w której kierowca ręcznie (a właściwie nożnie) uruchamia urządzenie automatyczne, którego praca jest całkowicie autonomiczna. Inaczej jest w hamulcu elektromechanicznym (porównaj rys. 6).



Rys. 50. Struktura mechatronicznego systemu działaniowego hamulca elektromechanicznego

Tutaj strumienie informacji i energii są całkowicie rozdzielone. Energia dostarczana do hamulca jest tu całkowicie podporządkowana informacji, co w poprzednim przykładzie miało miejsce tylko połowicznie. Noga kierowcy jest tu jedynie źródłem informacji o intencjach hamowniczych kierowcy. Energia do hamulca jest dostarczana ze źródła pomocniczego, stosownie do tych intencji. Źródłem tym jest akumulator bądź generator energii elektrycznej. Napędza on silnik elektryczny, który przez przekładnię (porównaj rys. 7) i szczęki wytwarza sterowany przebieg sił hamowania w styku szczęki-tarcza.

Wejściem informacyjnym jest nie tyle fizyczny pedał, ile symulator czucia pedału pod nogą. Intencje hamownicze kierowcy są przekazywane specjalnemu czujnikowi i rejestrowane. Płyną one bezpośrednio do mikroprocesora. Nie są jednak jego jedynym ważnym wejściem. Innym ważnym wejściem jest wyjście z czujnika obrotów kół. Mikroprocesor obrabia oba wejścia i na ich podstawie podejmuje decyzję o wyborze sposobu hamowania, wybierając następnie jeden z algorytmów hamowania, znajdujący się w pamięci przyłączonej do mikroprocesora.

Ten abstrakcyjny model mechatronicznego systemu działaniowego chciałbym teraz skonkretyzować empirycznie jako sztuczny system rzeczowy, czyli jako urządzenie mechatroniczne.

Mechatroniczny system rzeczowy

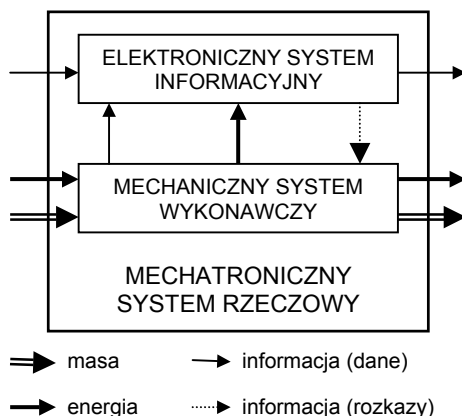
Pojęcie i hierarchia

W definicji techniki mechatronicznej wprowadziłem już *systemy*, nazywając je użytecznymi, sztucznymi i uprzedmiotowionymi wytworami mechaniczno-elektronicznymi. Teraz spróbuję objaśnić tę charakterystykę w szczegółach. Następnie posłużę się systemowym modelem techniki, aby opisać hierarchię mechatronicznych systemów rzeczowych, ich funkcje i struktury. Zrobię to w sposób niewymagający specjalistycznej wiedzy poszczególnych dyscyplin nauk technicznych, ale mimo to pozwalający scharakteryzować istotę urządzenia mechatronicznego i wyprowadzić klasyfikację urządzeń mechatronicznych. Najpierw chcę jednak uzasadnić dlaczego w ogóle wprowadziłem nowe pojęcie: *mechatroniczny system rzeczowy*.

Pojęcie *mechatroniczny system rzeczowy* wydaje się nadrzędnym pojęciem dla takich pojęć jak „maszyna mechatroniczna”, „urządzenie mechatroniczne”, „przyrząd mechatroniczny”, „aparatus mechatroniczny”, „agregat mechatroniczny”, „pojazd mechatroniczny”, „budowla mechatroniczna”, „instalacja mechatroniczna”, „ubiór mechatroniczny” itp., a także dla używanego coraz częściej pojęcia „system mechatroniczny”.

Model mechatronicznego systemu rzeczowego uzyskuje przez wyłączenie systemu określania celów z mechatronicznego systemu działaniowego. Jest to więc dalsza empiryczna interpretacja abstrakcyjnego mechatronicznego systemu działaniowego przedstawionego na rysunku 47. Mechatroniczne systemy rzeczowe są sztucznymi przedmiotami, z mechanicznym przetwarzaniem materiału i energii i elektronicznym przetwarzaniem informacji, i są uchwytą rzeczywistością w cza-

się i przestrzeni. Nie mają żadnych własnych celów, ale w coraz większym zakresie ucieleśniają różne ludzkie cele, a ich funkcje zastępują coraz bardziej działania i czynności człowieka (rys. 51).



Rys. 51. Schemat blokowy mechatronicznego systemu rzeczowego

Mechatroniczne systemy rzeczowe znajdują się w otoczeniu przyrodniczym, technicznym i społecznym. Jeżeli nowy mechatroniczny system rzeczowy zostanie umieszczony w otoczeniu społecznym, to „wchodzi” on przez to w przyrodę i społeczeństwo. Ponieważ jednak punkt ten poświęcony jest mechatronicznym systemom rzeczowym, skoncentruję się tu na otoczeniu technicznym.

Mechatroniczny system rzeczowy można potraktować jako część pewnej hierarchii. Chodzi o to, aby otoczenie techniczne zamodelować jako supersystem rzeczowy. W mechatronicznym systemie rzeczowym oczywiście należy przyjmować również podsystemy rzeczowe. Nie wszystkie one są mechatroniczne. Mogą być czysto mechaniczne, czysto elektroniczne czy czysto informatyczne. Za pomocą tych założeń można skonstruować hierarchię mechatronicznego systemu rzeczowego (przykładem jest rys. 11). Zawiera ona osiem poziomów, które, zależnie od celu badań, mogą być dalej precyzowane. Cel badań daje również wskazówkę, jakie poziomy hierarchii wybrać jako punkt wyjścia do opisu systemu, a wie jak system rzeczowy zostanie zdefiniowany. Zwykle wybiera się poziom, który w schemacie nazwany jest „maszyna” lub „urządzenie”; wszystkie nazwy są oczywiście tylko wyrażeniami pomocniczymi, które w praktyce nigdy nie są używane jednoznacznie, co można wywnioskować z tego schematu.

Mechatroniczny system rzeczowy „maszyna” składa się z systemów rzeczowych „zespoły”, a te z systemów rzeczowych „części”. Systemami rzeczowymi o najniższej randze są materiały, bo ich składniki należy rozumieć nie technicznie, lecz tylko chemicznie lub fizykalnie. Z drugiej strony „maszyna” jest częścią supersystemu „agregat” i „urządzenie”. Charakterystyczne dla dzisiejszego rozwoju techniki jest to, że hierarchie systemów rzeczowych coraz bardziej i bardziej rosną

w kierunku globalnych supersystemów. Widać to choćby na przykładzie komputera i internetu, systemu telefonicznego a także systemów produkcji. Taką tendencję wykazuje też proces globalizacji gospodarki. Skutek tych rosnących hierarchii jest taki, że obok systemów rzeczowych tego samego rodzaju (domenowych, dyscyplinowych) w supersystemy wiąże się również systemy różnego rodzaju (interdyscyplinowe). To ostatnie dotyczy właśnie mechatroniki, W ten sposób rośnie różnorodność i złożoność systemów rzeczowych wyższych rang.

W swej hierarchii mechatroniczny system rzeczowy jest mechatroniczny do pewnego poziomu w dół lub od pewnego poziomu w górę. I tak hamulec jest mechatroniczny od poziomu ABS w górę. Panowaniu nad wysoką złożonością systemów mechatronicznych służą różne modele struktur hierarchicznych. Zanim jednak do tych modeli przejdę, zajmę się bliżej funkcjami mechatronicznego systemu rzeczowego.

Funkcje

Ponieważ schemat blokowy dostarcza podstaw do opisu funkcjonalnego, muszę wrócić do rysunku 51. Fizykalna podstawa funkcji technicznych pociąga za sobą to, że również atrybuty, przez które funkcje te są definiowane, dają się obserwować i mierzyć fizykalnie. Można je opisywać jakościowo (według rodzaju) i ilościowo – wartościami liczbowymi jakiejś wielkości mierzalnej. Kategorie atrybutów, które tu występują ponownie, objaśniłem już w rozdziale 3. Oczywiście w systemach rzeczowych występują one bardziej pogładowo. I tak wejście materiałowe może występować jako dostarczanie surowca do maszyny przetwórczej, energetyczny atrybut stanu – jako ilość paliwa w zbiorniku pojazdu, a wyjście informacyjne – jako fale dźwiękowe w słuchawce telefonu komórkowego. W mechatronicznych systemach rzeczowych podstawową kategorią opisu, obok przestrzeni, jest również czas; są to bowiem systemy wybitnie dynamiczne.

Jeśli chcemy opisać jakiś mechatroniczny system rzeczowy za pomocą schematu na rysunku 21, to istnieją dwie możliwości. Po pierwsze można się ograniczyć do ujęcia samych tylko każdorazowo najważniejszych atrybutów. Istotne są te atrybuty, przez które definiuje się planowane i pożądane funkcje systemu rzeczowego. W przypadku hamulca jest to na przykład siła nacisku na pedał jako wejście a naciski jednostkowe klocka na tarczę hamulcową jako wyjście (porównaj rys. 9 i 10). Ponieważ wymiana płynu hamulcowego jest dla planowanej funkcji prawie całkowicie nieistotna, jest w takim typizującym opisie systemowym pomijana – właśnie tak, jak było w przeszłości, gdy inżynierowie tego rodzaju atrybutom poświęcali niewiele uwagi, jeśli tylko planowana funkcja była wypełniana skutecznie. To, że jednak tego rodzaju *oddziaływania poboczne* nie powinny być w żadnym przypadku ignorowane z punktu widzenia otoczenia (środowiska) naturalnego i społecznego, jest dziś oczywiste. Dlatego można inaczej wykorzystać model z rysunku 21 – jako obszerny schemat do poszukiwania wszystkich możliwych do pomyślenia oddziaływań pobocznych i również wyśledzenia możliwych zakłóceń z otoczenia. W tym przypadku przegląda się wszystkie klasy atrybutów tak, czy z tego lub innego punktu widzenia nie mogą mieć jednak znaczenia i wyklucza się jej gdy wykazują coś przeciwnego. W ten sposób schemat blokowy staje się owocny dla analizy

skutków techniki i wspiera takie kształtowanie techniki, które planowo wykonuje ekotechniczne i sojotechniczne optymalizowanie systemu rzeczowego.

Funkcje transformacyjne i funkcje celowe

Funkcje, za których pomocą chcemy opisać mechatroniczny system rzeczowy, mogą mieć charakter transformacyjny lub charakter celowy [BUUR 1995]. *Funkcje transformacyjne* są transformacjami wejść w wyjścia; *funkcje celowe* – efektami fizykalnymi wymaganymi w celu wykonywania tych transformacji. Pierwsze mówią o tym co system *robi*; drugie zaś o tym *jak on to robi* (jak on działa).

Mechatroniczny system rzeczowy może być opisany przez swą zdolność do transformowania materiału, energii czy informacji. Na przykład robot przemieszcza materiał, hamulec przetwarza energię, a telefon przekazuje informację. Mechatroniczny system rzeczowy możemy widzieć jako strukturę funkcji transformacyjnych, które przetwarzają trzy podstawowe operandy transformacji: materiał, energię lub informację (rysunek 51). Pojęcie transformacji jest bardzo przydatne do opisywania funkcji systemów mechanicznych, elektronicznych i oprogramowania. Należy przy tym jednak zauważyć, że elektronika może transformować tylko informacje.

Strukturę funkcjonalną transformacji możemy wizualizować w postaci schematów blokowych, takich jak na rysunkach 47-51. Schematy takie pokazują co dzieje się z operandem 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.

Mechatroniczny system rzeczowy transformuje informację w celu sterowania procesami materiałowymi lub energetycznymi. Operuje dwoma podstawowymi rodzajami informacji:

- *informacją procesową*, która jest transformowana przez system niezależnie od jej wartości semantycznej (jej znaczenia),
- *informacją sterowniczą*, którą jest transformowana przez system w celu sterowania funkcjami wewnętrznymi (informacja ta jest „rozumiana” przez system).

Na każdym poziomie względnie łatwo możemy rozróżnić oba rodzaje informacji. Jeżeli jednak mieć na uwadze przepływ informacji na kilku poziomach hierarchicznych, to rozróżnienie nie jest takie jasne. Elektroniczne sprzężenie zwrotne w robocie operuje informacją sterowniczą, ponieważ jej celem jest sterowanie ruchami 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 przetwarzanej informacji nie ma żadnego wpływu na ich funkcjonowanie.

Zdolność tworzenia potrzebnych efektów fizykalnych w mechatronicznych systemach rzeczowych, czyli skutków określonych zjawisk fizykalnych, można nazywać *funkcją celową*. Myślenie w kategoriach takich funkcji jest bardzo typowe dla konstruktorów klasycznych maszyn. Na przykład, gdy konstruktor mówi: „potrzebuję czegoś, co wytwarza ruch obrotowy”. *Ruch obrotowy* jest tu pożądanym efektem, a *wytwarza ruch obrotowy* jest funkcją zamierzoną podsystemu (silnika).

Mechatroniczny system rzeczowy może traktować jako pewną 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 spełniał swój cel.

Między funkcjami transformacyjnymi i celowymi istnieje pewna zależność przyczynowo-skutkowa. Weźmy jako przykład silnik elektryczny. Jego funkcja transformacyjna 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 pożądanego efektu: „Jak tworzymy ruch obrotowy? Przez transformowanie...” – można pomyśleć o wielu innych transformacjach, jakie 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.

Z punktu widzenia mechaniki i klasycznej budowy maszyn podstawowe funkcje mechatronicznego systemu rzeczowego można podzielić według rosnącej złożoności w następujący sposób [HEIMANN, GERTH, POPP 2001]:

- *Funkcje kinematyczne*. Chodzi tu o przygotowanie właściwego aparatu ruchowego, który spełnia wymaganą funkcję. Zadanie to przypada obszarowi kinematyki i zawiera geometryczny opis postawionego problemu.
- *Funkcje kinetyczne*. Chodzi tu o uwzględnienie sił i momentów, jakie konieczne są do wykonania postawionego zadania. Problem ten rozważa się za pomocą równań ruchu.
- *Funkcje mechatroniczne*. Chodzi tu o powiązanie sensoryki, algorytmów regulacji i aktyki, jak również dalszych komponentów. W ten sposób opis funkcjonalny zostaje uzupełniony i skompletowany.

Nastawianie, dopasowywanie, samooptymalizowanie

Najogólniej funkcje mechatronicznych systemów rzeczowych można opisać trzema rzeczownikami odśrodkowymi: nastawianie, dopasowywanie, samooptymalizowanie. Chodzi o nastawianie i dopasowywanie aparatu ruchowego (lub procesu realizowanego przez ten aparat) za pomocą aktorów, przez odpowiednie nastawianie

tych ostatnich. Odbywa się to przez realizowanie takich funkcji jak: sterowanie, regulacja, 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 metodami klasycznymi (analogowymi). Z drugiej strony mamy tu do dyspozycji funkcje dodatkowe, które uwidaczniają zalety powiązania mechatyki z mikroelektroniką. Funkcje te opierają się 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 1999].

Struktury

Struktura funkcjonalna i struktura konstrukcyjna

Pojęcie struktury urządzenia mechatronicznego można rozpatrywać na dwóch płaszczyznach: abstrakcyjnej i konkretnej. W pierwszym przypadku chodzi o powiązanie funkcji cząstkowych w całkowitą funkcję urządzenia; w drugim – o powiązanie części konstrukcyjnych, które są fizycznymi nośnikami różnych funkcji.

Strukturę funkcji (strukturę funkcjonalną) tworzą *elementy funkcjonalne*. Każdy z nich można traktować jako elementy logiczne z przynajmniej jednym wejściem i jednym wyjściem. Przedstawia się je za pomocą prostokątów ze strzałkami wchodzącymi i wychodzącymi. Strukturę budowy tworzą *elementy konstrukcyjne*. Są to elementy fizyczne, które są nośnikami funkcji (logiki). Elementy konstrukcyjne są zwykle zbudowane ze standardowych klocków (modułów) mechanicznych, elektrycznych, pneumatycznych, hydraulicznych czy elektronicznych. Element konstrukcyjny jest jednostką funkcjonalną, która jest równocześnie zamkniętą w sobie, zwartą częścią (np. opornik, tranzystor, chip itp.), która może być połączona z innymi częściami przez odpowiednie końcówki.

Obie struktury mogą się różnić lub być podobne. Zależy to od sposobu konstruowania urządzenia [ROTH 1983]. W *modułowej technice konstruowania* struktura budowy jest odzwierciedleniem struktury funkcjonalnej; elementy funkcjonalne (zespoły, podzespoły) powstają z małej liczby ciągle powtarzających się jednokowych części. Części te są wymienne, a ich połączenia i miejsca przyłączeń (np. wtyki) planowane są dla maksymalnej rozbudowy, jak to ma miejsce w klasycznych komputerach osobistych. Technika modułowa nie wykorzystuje optymalnie przestrzeni, ale pozwala na wymiennieść jednostek i dużą różnorodność funkcji całkowitej. Nieco inaczej jest w technice konstruowania z gotowych części (elementów) konstrukcyjnych. Tu również stosuje się małą liczbę ciągle powtarzających się części, ale dalece różnicuje się możliwości ich połączenia (przykładem mogą być płytki drukowane). Technika ta również nie wykorzystuje optymalnie przestrzeni, ale umożliwia największą różnorodność funkcji całkowitych za pomocą minimalnej liczby elementów. Zupełnie inaczej jest w „*organicznej*” *technice konstruowania*. W tym przypadku odgraniczenie sąsiadujących jednostek funkcjonalnych jest dowolne; podobnie jak w przypadku organów człowieka, gdzie koniec jednego orga-

nu często tworzy początek drugiego. Jednostki funkcjonalne, z punktu widzenia poszczególnych części, są zintegrowane funkcjonalnie, jak w przypadku układów scalonych. Technika „organiczna” zajmuje najmniej przestrzeni, jednak każda najmniejsza zmiana wymaga zwykle zmiany całej konstrukcji, a więc powstania konstrukcji nowej.

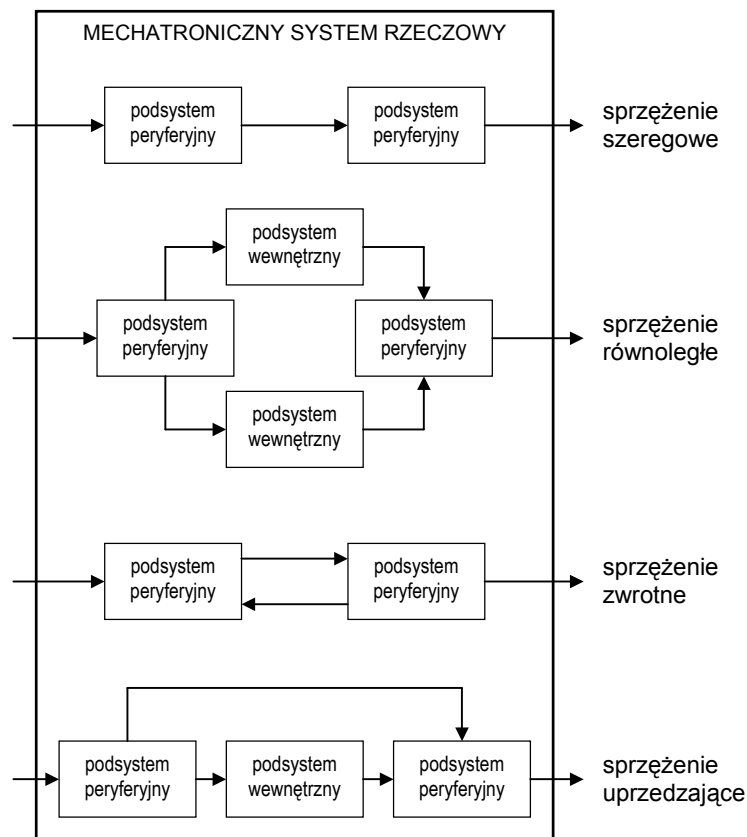
Formy struktury mechatronicznego systemu rzeczowego

Części systemu rzeczowego mogą być dalej opisane jako systemy rzeczowe. Wykazują one również atrybuty wejścia, atrybuty stanu i atrybuty wyjścia kategorii masa, energia, informacja, przestrzeń i czas i powiązują je w funkcje przemiany, transportu, magazynowania, zmiany stanu i zachowania (utrzymania) stanu.

Według stosunku do otoczenia mechatronicznego systemu rzeczowego można rozróżniać systemy peryferyjne i wewnętrzne. *Podsystemy peryferyjne* pozostają w związku z otoczeniem systemu rzeczowego przez wejścia i wyjścia; systemy te pobierają materiałowe, energetyczne i informacyjne wejścia z otoczenia lub oddają odpowiednie wyjścia do otoczenia. Natomiast *podsystemy wewnętrzne* są powiązane tylko z innymi podsystemami danego systemu rzeczowego; te podsystemy wykonują charakterystyczne dla systemu transformacje masy energii lub informacji.

Wśród relacji między podsystemami rzeczowymi panuje sprzężenie. I tak struktura systemu rzeczowego składa się przede wszystkim ze sprzężeń materiałowych, energetycznych i informacyjnych. Rysunek 52 pokazuje główne formy sprzężenia w mechatronicznym systemie rzeczowym: szeregowe, równoległe, zwrotne (feedback) i uprzedzające (feedforward). Zależnie od każdorazowo panujących zasad nauk przyrodniczych lub technicznych forma sprzężenia ma znaczny wpływ na całkowitą funkcję mechatronicznego systemu rzeczowego. Jeżeli przykładowo pojawi się zakłócenie w podsystemie o sprzężeniu szeregowym, to całkowita funkcja systemu rzeczowego przestaje być spełniana. Jeżeli natomiast jest zakłócany jeden z dwóch równoległe sprzężonych podsystemów, to funkcja całkowita może być utrzymana przynajmniej częściowo. Z tego robi się użytek w technice bezpieczeństwa, gdy kilka tego samego rodzaju podsystemów sprzęga się równoległe, aby w przypadku zakłócenia uszkodzony podsystem zastąpić natychmiast równoległym podsystemem.

Sprzężenie zwrotne (sprzężenie do tyłu, feedback) jest podstawowym atrybutem mechatronicznego systemu rzeczowego. Jest ono podstawowym zagadnieniem techniki regulacji i stanowi istotę mechatroniki. Polega na powrocie części wyjścia do procesu w celu sterowania i poprawy różnic, jakie występują między tym, co powinno być (wielkość zadana), a tym, co jest (wielkość otrzymana). Różnica między wartościami tych wielkości służy do wpływania na przebieg wyjścia (wielkości regulowanej) w taki sposób, aby wartość wielkości regulowanej nadążała za wartością wielkości zadanej. Często jednak przy tym powstaje opóźnienie nadążania. Rozwiązaniem jest *sprzężenie uprzedzające* (sprzężenie do przodu, feedforward). Uprzedzamy opóźnienie wyjścia podsystemu poprzedniego na podsystem następny. Idea jest prosta, znana od dawna, ale czasami trudna do zrealizowania.



Rys. 52. Podstawowe formy struktury mechatronicznego systemu rzeczowego

Oprócz struktur sprzężeniowych ważną rolę w systemach rzeczowych odgrywają również relacje przestrzenne i czasowe. Zbiór relacji czasowych tworzy się *strukturą przebiegu procesu*. Takie relacje czasowe określają przykładowo, że na podsystem działają równocześnie dwa wejścia lub że jedna z funkcji podsystemu musi przebiegać zależnie od drugiej. Zbiór relacji przestrzennych tworzy *strukturę kształtu*. Przykładem relacji przestrzennej jest współosiowość wału silnika i wału przekładni. Takie relacje przestrzenne są przedmiotem klasycznej działalności konstrukcyjnej i nie będziemy ich tu dalej rozwijać.

Powyższe struktury mają charakter elementarny. W mechatronicznym systemie rzeczowym występują sprzężenia jeszcze bardziej złożone. Dla struktury transformacji materiału i energii charakterystyczne są liczne sprzężenia szeregowe, które następnie, jak to pokazuje rysunek, przez dodatkowe połączenia i odgałęzienia tworzą łańcuchy oczkowe. W łańcuchach przepływu materiału, energii i informacji mogą występować liczne dalsze węzły. Dzieje się to wtedy, gdy przez kilka etapów wytwarza się operandy pośrednie o rosnącej złożoności lub gdy wyjście jednego etapu staje się ponownie wejściem kolejnego etapu.

Warstwowy model urządzenia mechatronicznego

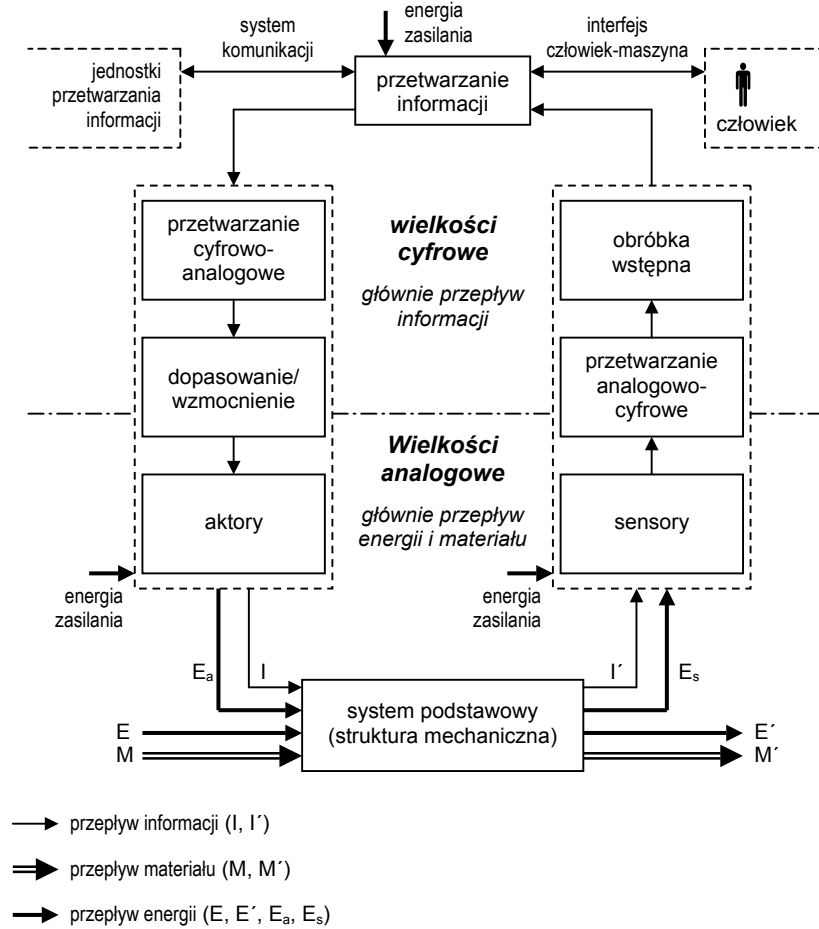
Pomocą w poradzeniu sobie ze złożonością problemów mechatronicznych może być warstwowy model urządzenia mechatronicznego (rys. 53). Dzieli on złożoną materię mechatroniczną na warstwy ułożone w pionowy stos. Granice warstw można ustalić tak, aby każda z nich dawała się rozpatrywać w odizolowaniu od innych, a problem częściowy, traktować jako zamknięty w sobie. Warstwy „górne” korzystają z usług warstw „dolnych”, a warstwy „dolne” oferują usługi warstwom „górnym”. Pomiędzy warstwami znajdują się skrupulatnie zdefiniowane interfejsy. Każda warstwa „widzi” tylko warstwę leżącą pod nią i to mianowicie jako zamkniętą, wyabstrahowaną jednostkę. Najwyżej jest człowiek. Widzi on urządzenie mechatroniczne jako zastosowanie maszyny wirtualnej do realizacji maszyny realnej, przetwarzającej materiały, energię i informację.

CZŁOWIEK			
logika mechatronika jako system działań (czynności)	programy systemowe system operacyjny środowiska programowania programy narzędziowe interfejs człowiek-maszyna programy użytkowe (aplikacje)	oprogramowanie (software)	maszyna wirtualna
	assembler programy maszynowe mikroprogramy magistrale	oprogramowanie wbudowane (firmware)	
mechatronika jako system rzeczy	podstawowe elementy konstrukcyjne (mechaniczne, hydrauliczne, pneumatyczne, elektryczne, elektroniczne, optyczne ...)	sprzęt (hardware) urządzenia, maszyny, budynki, budowle, agregaty, instalacje ...	maszyna realna
	elementarne układy, obwody, sieci (mechaniczne, hydrauliczne, pneumatyczne, elektryczne, elektroniczne, optyczne ...)		
fizyka	zjawiska fizyczne (mechaniczne, hydrauliczne, pneumatyczne, elektryczne, elektroniczne, optyczne ...)		
	procesy atomowe w ciałach stałych, cieczach i gazach		

Rys. 53. Warstwowy model urządzenia mechatronicznego

Integrowanie struktury urządzenia mechatronicznego

Integrowanie struktury urządzenia mechatronicznego polega na powiązaniu ze sobą „inteligentnych” elementów, z których każdy umożliwia rozwiązanie jednej z funkcji. Zachowanie całego systemu jest kształtowane przez komunikację i kooperację tych elementów. Z punktu widzenia informatyki chodzi tu o systemy rozłożone z wzajemnie kooperującymi agentami [GAUSEMEIER, RIEPE, LÜCKEL 2000].



Rys. 54. Powiązanie struktury mechanicznej, sensoryki, przetwarzania informacji aktryki przez strumienie materiału, energii i informacji oraz podstawowa budowa inteligentnej sensoryki i aktryki

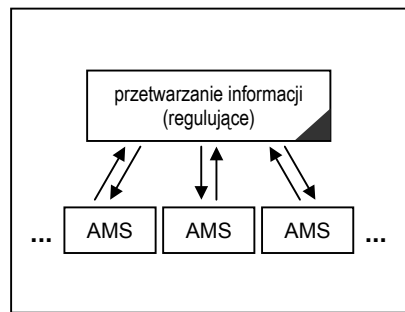
Agent jest autonomicznym, proaktywnym, kooperatywnym i wysoce adaptacyjnym modułem funkcjonalnym. Autonomiczność zakłada samodzielną kontrolę, która inicjuje się sama z działań, akcji (stąd proaktywność). Agenty widziane są jako moduły

funkcjonalne, działające w kooperacji lub konkurencji. Adaptacyjność oznacza zachowanie generowane w czasie przebiegu, co może na przykład obejmować również zdolność uczenia się. Moduł funkcjonalny rozumiany jest jako heterogeniczny podsystem z komponentami elektronicznymi, mechanicznymi i komputerowymi. Urządzenie mechatroniczne składa się z systemu podstawowego – to znaczy struktury technicznej, sensorów, aktorów i przetwarzania informacji (rys. 54 [GAUSEMEIER, RIEPE, LÜCKEL 2000]). To ostatnie zwykle przeprowadza mikroprocesor z oprogramowaniem. Sensory mierzą wielkości stanu systemu podstawowego. Informacje są przekazywane do jednostek przetwarzania informacji i określane są konieczne oddziaływania. Przetworzenie tych koniecznych oddziaływań następuje za pomocą aktorów bezpośrednio do systemu podstawowego.

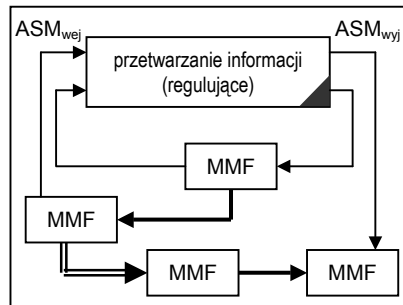
System podstawowy urządzenia mechatronicznego składa się z jednostek powiązanych przez trzy rodzaje strumieni: materiału, energii i informacji (sygnału) Na pierwszym planie przy tym często strumienie energii i materiału. Strumienie, które łączą system podstawowy z sensoryką i aktoryką, mają zarówno charakter strumieni energii jak i strumieni informacji, gdyż zarówno dla pomiarów (sensoryki) jak również dla działania (aktoryki) „płyń” energia; z drugiej strony przekazywane są także informacje – informacje sterujące do aktoryki i informacje pomiarowe z sensoryki. Zarówno w obszarze sensoryki jak i aktoryki dąży się dziś do przestrzennego zintegrowania sensorów i aktorów z innymi jednostkami funkcjonalnymi. Dające się zintegrować jednostki funkcjonalne są przetwornikami analogowo-cyfrowymi i mikroprocesorami do „inteligentnych” sensorów jak również cyfrowo-analogowymi przetwornikami i połączeniami dopasowującymi i wzmacniającymi do „inteligentnych” aktorów.

Dalsza forma strukturyzowania hierarchicznego w celu opanowania wysokiej złożoności systemów mechatronicznych jest zaproponowana na rysunku 55 [GAUSEMEIER, RIEPE, LÜCKEL 2000]. Podstawą są tak zwane mechatroniczne moduły funkcjonalne (MMF). Składają się one ze struktury nośnej, sensorów, aktorów i lokalnego przetwarzania informacji. Autonomiczne systemy mechatroniczne (ASM) są zbudowane z MMF powiązanych komputerowo i/lub mechanicznie. Mają one własne sensory i własną obróbkę informacji. Realizuje ona zadania nadrzędne, jak nadzorowanie, diagnostykę i decyzje naprawcze, oraz generuje nastawy dla lokalnego przetwarzania informacji przez MMF. ASM-y tworzą tak zwane zsięciowane systemy mechatroniczne (ZSM). ZSM-y powstają wyłącznie na podstawie powiązania ASM-ów drogą przetwarzania informacji. Analogicznie do ASM-ów w przetwarzaniu informacji w ZSM-ach spełniane są zadania nadrzędne. Przenosząc to na technikę pojazdów: Aktywne zawieszenia są MMF-ami, pojazdy z mechatronicznym mechanizmem jezdny – ASM-ami a zestawy pojazdów – ZSM-ami.

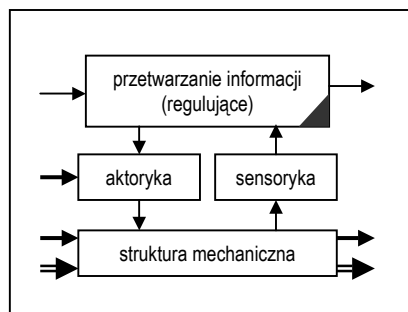
Komponenty systemu podstawowego pracują głównie za pomocą strumieni energii i materiału, to znaczy za pomocą wielkości analogowych. Natomiast jednostki przetwarzające informacje pracują dziś prawie wyłącznie za pomocą wartości cyfrowych. Inteligentna sensoryka i aktoryka pomaga prosto pośredniczyć między różnymi obszarami fizykalnymi. W ten sposób następuje integracja przetwarzania informacji w urządzeniu, co sprzyja jego optymalizacji, a nawet samoopptymalizacji.



ZSM: zsieciowane systemy mechatroniczne



ASM: autonomiczny system mechatroniczny



MMF: mechatroniczny moduł funkcjonalny

Rys. 55. Hierarchiczne strukturyzowanie systemu mechatronicznego

Przez samoopptymalizację systemu technicznego rozumie się endogeniczną zmianę wektora celu na podstawie zmienionych warunków otoczenia i wynikające stąd odpowiednie autonomiczne dopasowanie struktury, zachowania i parametrów tego systemu. Tak więc samoopptymalizacja wykracza istotnie poza znane strategie regulacji i adaptacji; samoopptymalizacja umożliwia systemy zdolne do działania z nierozłączną „inteligencją”, zdolne do tego, aby reagować samodzielnie i elastycznie na zmienione warunki otoczenia.

Rozważanie systemów samoopptymalizujących się ujmuje cztery aspekty: (1) system docelowy (np. hierarchiczny system celów lub wektor celów), (2) strukturę (to znaczy topologię komponentów mechanicznych, sensorów i aktorów), (3) zachowanie i (4) parametry. Zgodnie z tym samoopptymalizacja wyraża się dwiema właściwościami:

- endogeniczną (pochodzącą z wewnątrz) zmianą systemu docelowego z powodu zmiany czynników wpływających na system techniczny,
- zgodnym z celami, samoczynnym dopasowaniem się parametrów, dopasowaniem się zachowania i dopasowaniem się struktury.

W takich systemach na regulujące przetwarzanie informacji nakłada się samoopptymalizujące przetwarzanie informacji.

Samoopptymalizujące przetwarzanie informacji podaje przetwarzaniu regulującemu system celów strukturę, zachowanie i parametry. W tym celu opptymalizujące przetwarzanie informacji potrzebuje dwóch kategorii wiedzy:

- wiedzy o możliwych systemach docelowych, strukturach, zachowaniach i parametrach,
- wiedzy o procesach wyboru lub procesach adaptacji dotyczących powyższych aspektów.

Podczas strukturyzowania systemów mechatronicznych na mechatroniczne moduły funkcjonalne (MMF), autonomiczne systemy mechatroniczne (ASM) i sieciowane systemy mechatroniczne (ZSM) ważne są następujące aspekty:

- Samoopptymalizacja na wszystkich poziomach: Samoopptymalizujące przetwarzanie informacji może następować na wszystkich poziomach systemów mechatronicznych (tzn. MMF, ASM, ZSM). Na tej podstawie mogą na każdym poziomie być realizowane mechanizmy samoopptymalizacji i za pomocą strukturyzowania tak dalece uogólniane, że powstają z tego ponownie stosowalne moduły samoopptymalizujące się.
- W pobliżu aktora: Rozpatrywane systemy mechatroniczne są strukturyzowane hierarchiczne. Na poziomie najniższym, to znaczy na poziomie mechatronicznych modułów funkcjonalnych (MMF), reagują aktory.
- Czasy reakcji: Z dzisiejszego punktu widzenia „szybka i pewna” samoopptymalizacja rozwiązywana jest przez przełączenie parametrów. Oprócz tego potrzeba przewidzieć zmiany. Temu przeciwstawia się tak zwaną „powolną” samoopptymalizację, to znaczy system nastawia się na zmiany i uczy się. Może przy tym dojść do konstelacji (topologii), które w projekcie nie zostały przewidziane i wymyślone.
- Hybrydowe przetwarzanie informacji: Oznacza to, że przetwarzanie informacji on-line może być generalnie biorąc dyskretne i ciągle (przyczyną jest struktura mechaniczna maszyny).

Otwartość, rekurencyjność i fraktalność struktury

Klasyczna budowa maszyn koncentrowała się na strukturach monolitycznych, jednorodnych. Ostatnie lata XX wieku przyniosły, za sprawą sprzętu komputerowego, zmianę w postaci rozwoju otwartej, modułowej architektury dla sprzętu i ogólnego oprogramowania dla systemu operacyjnego. Struktura sprzętu stała się tak otwarta, że można montować i integrować w istocie wszystkie techniczne modyfikacje zespołów i części bez narażania pozostałych części systemu. Ta koncentracja na otwartej architekturze pozwala ciągle poprawiać osiągi przez redukcję kosztów, inaczej niż w klasycznych technikach wytwarzania.

Dzięki temu stało się możliwe otwarcie architektury urządzeń mechatronicznych. Aktory mogą być produkowane w małych seriach standardowych wielkości, a znajdować szerokie zastosowanie w najróżnorodniejszych urządzeniach. Takie standardowe aktory zawierają w sobie sensory, silniki, łożyska przekładnie, hamulce, sterowniki elektroniczne, okablowanie, magistrale komunikacyjne itd. A więc cały przekrój dyscyplin techniki. Taki aktor ma takie samo znaczenie dla urządzenia mechatronicznego, jak chip dla komputera [TESAR 1999].

Przedstawiony modele struktury mają charakter *rekurencyjny*, to znaczy czyli dają się wyrazić za pomocą elementów uprzednio znanych. Modele te nadają się więc do opisanego urządzenia mechatronicznego na wszystkich poziomach – poziomie elementów, poziomie modułów, poziomie produktów i poziomie systemów. Każda jednostka wyższej hierarchii jest samopodobna – składa się z sensorów, aktorów, mikroprocesorów, wejścia i wyjścia. Przedstawiony model systemowy jest fraktalny, to znaczy może być zastosowany na różnych poziomach rozważań przy tym samym sposobie postępowania. Wspiera więc projektowanie systemów technicznych, których wewnętrzna struktura nie musi być znana przez konstruktora w szczegółach, wystarczy czarna skrzynka.

Podsumowanie

W rozdziale tym naszkicowałem ogólny model mechatronicznego systemu działaniowego. Niezbędny do tego był potencjał integracyjny dla interdyscyplinarnej syntezy techniki mechatronicznej. Potencjał ten ma dwa aspekty: (1) formalny, oferowany przez ogólną teorię systemów, oraz (2) materialny, oferowany przez teorię działania. Powstał w ten sposób schemat pomagający ująć i opisać mechatronikę w jej współzależnościach indywidualnych i społecznych.

Przez działanie mechatroniczne rozumiem funkcję mechatronicznego systemu działaniowego. Polega ona na przeprowadzeniu określonej sytuacji początkowej (wejścia, stany i cele urządzenia mechatronicznego) w pożądaną sytuację końcową (stany i wyjścia urządzenia mechatronicznego). Wejścia, stany i wyjścia dają się przyporządkować trzem kategoriom – masie, energii i informacji – oraz występują w przestrzeni i czasie. Jeżeli rozłożymy mechatroniczną funkcję działaniową, to przez obwód działaniowy dojdziemy do teoretycznej mechatronicznej struktury działaniowej, która w pierwszym przybliżeniu obejmuje funkcję określania celów przez człowieka, funkcję przetwarzania informacji za pomocą urządzeń elektronicznych i funkcję wykonania działania za pomocą urządzeń mechanicznych.

W drugim przybliżeniu można funkcje informacyjne i wykonawcze rozłożyć na dalsze funkcje cząstkowe, które w tej lub innej postaci dają się odnaleźć w każdym empirycznym mechatronicznym systemie działaniowym. Szczególnie istotna jest tu obecność funkcji magazynowania informacji i wewnętrznych modeli tego magazynowania, ponieważ podkreśla to znaczenie, jakie dla działania mechatronicznego ma wiedza.

Ten abstrakcyjny model mechatronicznego systemu działaniowego skonkretyzowałem następnie empirycznie jako sztuczny system rzeczowy, czyli jako urządzenie mechatroniczne. Model mechatronicznego systemu rzeczowego uzyskałem przez wyłączenie systemu określania celów z mechatronicznego systemu działaniowego. Mechatroniczne systemy rzeczowe reprezentują sztuczne przedmioty, z mechanicznym przetwarzaniem materiału i energii i elektronicznym przetwarzaniem informacji, i są uchwytą rzeczywistością w czasie i przestrzeni. Nie wytwarzają żadnych własnych celów, ale w coraz większym zakresie ucieleśniają różne ludzkie cele, a ich funkcje zastępują coraz bardziej działania i czynności człowieka. Mechatroniczne systemy rzeczowe znajdują się w otoczeniu przyrodniczym, technicznym i społecznym. Jeżeli nowy mechatroniczny system rzeczowy zostanie umieszczony w otoczeniu społecznym, to wchodzi on przez to w przyrodę i społeczeństwo.

W rozdziale tym pokazałem równocześnie jak abstrakcyjny model systemowej teorii techniki można skonkretyzować dla opisu procesu hipostazy¹⁸ działań człowieka. Systemowa teoria techniki nie zawiera żadnych założeń dotyczących jednej dyscypliny. Za jej pomocą można nie tylko opisać realnie istniejący stan techniki mechatronicznej, lecz również skonceptualizować radykalne alternatywy. Nie chodziło mi o to, aby opracować obszerną systemową teorię mechatroniki; szkic ten przedstawia jedynie pewne klocki do tego. Pokazałem raczej ramy koncepcyjne, w których stawiam systemową teorię urządzenia mechatronicznego.

¹⁸ Hipostaza – przypisywanie realnego istnienia takim abstraktom, jak stany, cechy, stosunki, zdarzenia; uprzedmiotowienie

5. Powstawanie urządzenia mechatronicznego

W rozdziale tym chciałbym przedstawić bliżej współzależności i uwarunkowania, które towarzyszą powstawaniu mechatronicznych systemów rzeczowych. Zaczę od ogólnej perspektywy historycznej rozwoju urządzeń mechatronicznych. Następnie skonkretyzuję ją na dwóch przykładach ewolucji mechatronicznej: rozwoju konstrukcji samochodu i rozwoju konstrukcji hamulca. Po tym wprowadzeniu historycznym zdefiniuję pojęcie rozwoju mechatronicznego. Pokażę, że od strony technicznej rozwój ten można opisać przez zapożyczenie z biologii pojęć ontogenezy i filogenezy, a od strony społecznej ukazać go jako naturalny etap technizowania pracy człowieka.

W kolejnych podrozdziałach zajmę się zagadnieniami projektowania mechatronicznego. Zaczę od krótkiego przedstawienia wymagań, jakie się dziś stawia urządzeniom mechatronicznym i pokażę skąd się te wymagania biorą. Następnie omówię najbardziej charakterystyczne cechy projektowania mechatronicznego: dążenie do synergii i kluczową rolę sterowania. W kolejnym podrozdziale zajmę się modelami projektowania mechatronicznego. Zrobię to na przykładzie modeli stosowanych w robotyce – centralnym obszarze mechatroniki. Przedstawię metody ogólnej inżynierii systemów dla rozwoju konstrukcji urządzenia mechatronicznego, modelowanie podstawowych rozwiązań z punktu widzenia mechaniki, automatyki, oprogramowania i elektroniki oraz zagadnienie projektowania elektronicznego w środowisku mechatronicznym. Rozdział zakończę dwoma podsumowaniami. Pierwsze będzie syntetycznym przedstawieniem etapów projektowania mechatronicznego; drugie będzie pokazaniem, że projektowanie mechatroniczne jest z punktu widzenia systemowej teorii techniki niczym innym jak systemem działanowym.

Perspektywa historyczna

Z formalnego punktu historię mechatroniki należałoby zacząć od pierwszych zastosowań elektroniki do automatyzowania pracy urządzeń mechanicznych, czyli od połowy XX wieku. Nie można jednak przy tym nie zauważyć, że udany rozwój zautomatyzowanych systemów mechanicznych miał miejsce dużo, dużo wcześniej. Elektronika nie jest bowiem źródłem automatyzacji. Jest nim logika, która może być realizowana różnymi nośnikami: mechaniką, hydrauliką, pneumatyką czy właśnie elektroniką. Dlatego nie dziwi nikogo, że pierwsze zastosowania automatycznych systemów sterowania (regulator pływakowy utrzymujący stały poziom oliwy a przez to stały jej dopływ do knota w lampie oliwnej) pojawiły się w Grecji ponad 2000 lat temu, a więc w tym samym okresie historycznym, kiedy rodziła się logika arystotelesowska. Poniżej przedstawię skrótowo perspektywę historyczną mechatroniki w ujęciu BISHOPA i RAMASUBRAMANIANA [2002].

Od regulatora odśrodkowego do automatyzacji mechanicznej

Między XVII a XIX wiekiem powstało wiele ważnych urządzeń, na których można prześledzić wkład do rozwoju automatyki i mechatroniki. Mam tu na myśli regulatory temperatury, regulatory ciśnienia oraz mechaniczne maszyny liczące. Milowym krokiem był tu odśrodkowy regulator WATTA do regulacji prędkości maszyny parowej. Przez pomiar szybkości obrotów wału wyjściowego i użycie ruchu obrotowego kul do sterowania zaworem sterowana była ilość pary wpływającej do silnika. Gdy szybkość silnika rosła, kule metalowe aparatu ruchowego podnosiły się, pociągając za sobą kołnierz z cięgnami, które zamykały zawór pary. Jest to przykład systemu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym (feedback), w którym sygnał sprzężenia zwrotnego (sensoryka) i działanie sterujące (aktoryka) są realizowane całkowicie przez urządzenia mechaniczne (mechanical hardware).

Te pierwsze udane układy automatyzacji powstały dzięki intuicji, zastosowaniu wyćwiczonych umiejętności praktycznych i wytrwałości. Następny etap ewolucji automatyzacji wymagał teorii sterowania automatycznego. Prekursorem sterowanych numerycznie (NC) maszyn dla zautomatyzowanego wytwarzania (opracowanych w połowie XX wielu) było wynalezienie ponad sto lat wcześniej krosno JACQUARDA ze sprzężeniem uprzedzającym (*feedforward*). Pod koniec XIX wieku MAXWELL, przez analizę układu równań różniczkowych opisujących regulator odśrodkowy, zainicjował przedmiot znany dziś jako teoria sterowania. MAXWELL badał jak różne parametry systemu wpływają na jego osiągi. W tym samym czasie WYSZNIĘGRADSKI sformułował matematyczną teorię regulatorów. W latach trzydziestych XIX wieku FARADAY opisał prawa indukcji, będące podstawą działania silnika elektrycznego i prądnicy elektrycznej. Następnie w późnych latach osiemdziesiątych XIX wieku TESLA wynalazł silnik indukcyjny prądu przemiennego. Podstawowa idea sterowania systemu mechanicznego automatycznie została ściśle ugruntowana pod koniec XIX wieku.

Ewolucja automatyzacji przyspieszała mocno w XX wieku. Rozwój pneumatycznych elementów sterowania w latach trzydziestych XX wieku dojrzał do zastosowań w przemysłach procesowych. Jednak aż do 1940 roku projektowanie systemów sterowania odbywało się metodą prób i błędów. Postęp w zakresie metod matematycznych i analitycznych, jaki miał miejsce w latach czterdziestych ubiegłego wieku, doprowadził do wykształcenia się inżynierii sterowania (automatyki) jako niezależnej dyscypliny inżynierskiej. W USA rozwój systemów telefonicznych i elektronicznych wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym zachęciły BODEgo, NYQUISTA i BLACKA do użycia sprzężenia zwrotnego w laboratoriach Bella. Działanie wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym zostało opisane w dziedzinie częstotliwości, a powstałe z tego praktyki projektowania i analizy są dziś klasyfikowane jako „sterowanie klasyczne”. W tym samym okresie teoria sterowania była również rozwijana w Rosji i Europie wschodniej. Matematycy i mechanicy w dawnym Związku Radzieckim zdominowali dziedzinę sterowania i skoncentrowali się na sformułowaniu dotyczących dziedziny czasu oraz na modelach systemów opisywanych równaniami różniczkowymi. W latach sześćdziesiątych XX wieku nastąpił rozwój modeli w dziedzinie czasu za pomocą reprezentacji w postaci zmiennych stanu.

Wyształciła się w ten sposób praktyka projektowania i analizowania, którą dziś ogólnie klasyfikuje się jako „sterowanie nowoczesne”.

Wysiłek w okresie drugiej wojny światowej przyniósł znaczący postęp w teorii i praktyce sterowania automatycznego. Zaowocowało to projektami i konstrukcjami takimi jak: pilot automatyczny, systemy pozycjonowania dział czy sterowania antenami radarów. Złożoność i oczekiwane osiągi tych systemów militarnych wymuszały rozszerzenie dostępnych technik sterowania, wzmacniały zainteresowanie systemami sterowania i rozwojem nowych spojrzeń i metod. Po drugiej wojnie światowej zaczęły dominować techniki dziedziny częstotliwościowej; rosło zastosowanie transformaty LAPLACE'a i projektowanie systemów sterowania za pomocą miejsc biegunowych.

W obszarze komercyjnym, gdzie niskie koszty osiąga się dzięki produkcji masowej, automatyzacja procesu produkcji stawała się najwyższym priorytetem. W latach pięćdziesiątych zastosowanie krzywek, mechanizmów wielocłonowych i napędów łańcuchowych spowodowało wprowadzenie nowych technologii produkcji. Przykładem mogą być maszyny włókiennicze, drukarskie i papiernicze, maszyny do szycia. Rzeczywistością stało się precyzyjne wytwarzanie masowe. Automatyczna maszyna do wytwarzania pudełek papierowych potrafiła wykonywać 200 pudełek na minutę i nie zawierała żadnego niemechanicznego podsystemu poza silnikiem elektrycznym.

Narodziny mikroprocesora i mechatroniki

Rozwój mikroprocesora w końcu lat sześćdziesiątych XX wieku doprowadził do pierwszych sterowań komputerowych w projektowaniu produktów i procesów. Przykładem są maszyny sterowane numerycznie (NC) i systemy sterowania samolotów. Procesy wytwarzania były jednak nadal całkowicie mechaniczne w swej naturze; systemy sterowania i automatyzacji wbudowywano dopiero po wykonaniu maszyny. Nowym impulsem w rozwoju sterowanych systemów mechatronicznych było wystrzelenie sputnika i nadejście ery kosmicznej. Rakiety i sondy kosmiczne wymusiły rozwój złożonych, wysoce dokładnych systemów sterowania. Konieczność minimalizacji masy satelity (to znaczy minimalizacji ilości paliwa pobieranego dla misji), przy zapewnianiu dokładnego sterowania, zachęciła do czynienia postępów w ważnym obszarze sterowania optymalnego. Metody dziedziny czasu, opracowane przez LAPUNOWA, PONTRIAGINA, MINORSKIEGO i innych, jak również teorie sterowania optymalnego, opracowane przez PONTRIAGINA w dawnym Związku Radzieckim i przez BELLMANA w USA, dobrze pasowały do rosnącej dostępności szybkich komputerów i nowych języków programowania dla użytku naukowego.

Rozwój wytwarzania półprzewodników i obwodów scalonych doprowadził do powstania nowej klasy produktów. Mechanika i elektronika zaczęły zlewać się w jeden system, w którym obie dyscypliny są wymagane ze względów funkcjonalnych. Dla takich systemów firma Yasakawa wprowadziła w 1969 roku termin „mechatronika”. Firmie tej został przyznany znak handlowy w 1972 roku, ale po rozpowszechnieniu się terminu firma pozbyła się znaku w 1982 roku. Na początku mechatronika odnosiła się tylko do systemów tylko zawierających systemy mecha-

niczne z komponentami elektronicznymi, bez żadnej komputacji (sterowania komputerowego). Przykładami takich systemów były automatyczne drzwi przesuwne, maszyny sprzedające, otwieracze drzwi garażowych.

W późnych latach siedemdziesiątych XX wieku Japońskie Towarzystwo Przemysłu Maszynowego (JSPMI) sklasyfikowało produkty mechatroniczne w cztery kategorie:

1. *Klasa I*: Pierwotnie mechaniczne produkty z elektroniką wbudowaną w celu rozszerzenia funkcjonalności. Przykłady: obrabiarki sterowane numerycznie, napędy o zmiennej szybkości w maszynach wytwórczych.
2. *Klasa II*: Tradycyjne systemy mechaniczne z istotnie udoskonalonymi urządzeniami wewnętrznymi, zawierającymi elektronikę. Przykłady: nowoczesna maszyna do szycia, zautomatyzowane systemy wytwórcze.
3. *Klasa III*: Systemy z zachowaną funkcjonalnością tradycyjnych systemów mechanicznych, ale z elektroniką w miejsce wewnętrznych mechanizmów. Przykład: zegarek cyfrowy.
4. *Klasa IV*: Produkty zaprojektowane przez synergiczną integrację techniki mechanicznej i elektronicznej. Przykłady: fotokopiarki, inteligentne pralki i suszarki, garnki do gotowania ryżu, piece automatyczne.

Pojawiające się nowoczesne technologie dla każdej klasy produktu mechatronicznego ilustrują wzrost produktów elektromechanicznych w tempie odpowiadającym rozwojowi teorii sterowania, technologii informacyjnej i mikroprocesorów. Produkty klasy I były możliwe dzięki technice serwomechanizmów, elektronice mocy i teorii sterowania. Produkty klasy II – dzięki dostępności wczesnych urządzeń do obliczania i zapamiętywania oraz dzięki możliwościom projektowania obwodów na zamówienie. Produkty klasy III polegały głównie na mikroprocesorach i obwodach scalonych zastępujących systemy mechaniczne. Produkty klasy IV dały początek prawdziwym systemom mechatronicznym, przez integrację systemów mechanicznych i elektroniki. Nie miało to miejsca do lat siedemdziesiątych XX wieku, kiedy to, wraz z rozwojem konstrukcji mikroprocesora przez firmę Intel, praktyką stała się integracja systemów komputerowych w systemy mechaniczne.

Podział na sterowanie klasyczne i sterowanie nowoczesne został znacznie zredukowany w latach osiemdziesiątych XX wieku wraz z nadejściem teorii sterowania krzepkiego (robust control theory). Dziś na ogół akceptuje się taki stan, że inżynieria sterowania w analizie i projektowaniu systemów sterowania musi się zajmować obiema podejściami jednocześnie: podejściem w dziedzinie czasu i podejściem w dziedzinie częstotliwości. W dekadzie lat osiemdziesiątych XX wieku użycie komputerów cyfrowych, jako integralnych komponentów systemów sterowania, stało się rutyną. Dziś mamy miliony zainstalowanych mikrokomputerów do sterowania procesami cyfrowymi. Bez względu na to, jaką definicję mechatroniki przyjmujemy, zawsze jest oczywiste, że nowoczesna mechatronika zawiera komputację jako element centralny. A to dlatego, że istotą urządzeń mechatronicznych jest zastosowanie mikroprocesora do precyzyjnego modulowania energii mechanicznej. To precyzyjne modulowanie energii służy ogólnej funkcji urządzenia mechatronicznego – dopasowaniu (adaptowaniu) do zmian procesu (jaki urządzenie

realizuje) i do zmian otoczenia (w jakim urządzenie pracuje). Ponieważ dopasowanie jest jedną z cech inteligencji, urządzenia mechatroniczne nazywa się często inteligentnymi (intelligent) lub zmyślnymi (smart).

W tym miejscu chciałbym wspomnieć o nowej dyscyplinie, która właśnie dopasowywanie uczyniła swą istotą. Mam na myśli adaptronikę [CULSHAW 1999]. W szerokim ujęciu mechatronika i adaptronika wydają się dwiema stronami tego samego medalu. O ile mechatronika jest nazwą strukturalną, o tyle adaptronika jest nazwą funkcjonalną. Ta pierwsza wskazuje z czego urządzenie jest zbudowane, druga zaś – po co jest budowane. W tym kontekście należałoby wspomnieć o strukturotronice [1998], usiłującej zajmować się inteligentnymi strukturami konstrukcyjnymi

Przykłady ewolucji mechatronicznej

Rozwój konstrukcji samochodu jako systemu mechatronicznego

Ewolucję mechatroniczną dobrze ilustruje przykład rozwoju konstrukcji samochodu [BISHOP i RAMASUBRAMANIAN 2002]. Do lat sześćdziesiątych XX wieku jedynym urządzeniem elektronicznym w samochodzie było radio. Wszystkie inne funkcje były realizowane całkowicie mechanicznie lub elektrycznie, jak np. rozrusznik i układ ładowania akumulatora. Poza zderzakami i elementami konstrukcji nadwozia nie było żadnych „inteligentnych systemów bezpieczeństwa” do ochrony pasażerów podczas wypadku. Pasy przy siedzeniach, wprowadzone na początku lat sześćdziesiątych, miały na celu poprawienie bezpieczeństwa pasażera i działały całkowicie mechanicznie. Wszystkie systemy silnika były sterowane przez kierownicę i/lub inne mechaniczne systemy sterowania. Do sterowania zapłonem używano był rozdzielacz mechaniczny. Zmienną sterowaną była chwila zapłonu. Mechanicznie sterowany proces zapłonu nie był optymalny z punktu widzenia sprawności spalania i zużycia paliwa. Modelowanie procesu spalania pokazało, że dla rosnącej sprawności spalania i zmniejszenia zużycia paliwa istnieje optymalna chwila (początek) zapłonu. Ta chwila zależy od obciążenia silnika, jego szybkości (liczby obrotów) i innych mierzalnych wielkości. Elektroniczny układ zapłonowy był jednym z pierwszych systemów mechatronicznych, które zostały wprowadzone do samochodów pod koniec lat siedemdziesiątych. Układ ten składa się z sensora pozycji wału korbowego, sensora pozycji wałka krzywkowego, sensora przepływu powietrza, sensora pozycji przepustnicy, sensora zmiany pozycji przepustnicy oraz specjalistycznego mikrokontrolera, określającego chwilę zapłonu. Wczesne wdrożenia zawierały tylko sensor Halla do dokładnego wykrywania pozycji wałka rozdzielacza. Kolejne wdrożenia całkowicie wyeliminowały rozdzielacz i bezpośrednio sterowały zapłonem za pomocą mikroprocesora.

System przeciwdziałający blokowaniu kół podczas hamowania (ABS) został również wprowadzony pod koniec lat siedemdziesiątych. ABS działa przez wyczuwanie zablokowania jednego z kół i następujące po tym modulowanie ciśnienia hydraulicznego w układzie hamulcowym. Celem jest zminimalizowanie lub wyeliminowanie poślizgu koła i utrzymanie przez to przyczepności niezbędnej do skręcania samochodem. System sterowania trakcją (niem. ASR, ang. TCS) został wprowadzony w połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku. ASR działa przez wyczuwanie

poślizgu kół napędzanych podczas przyspieszania i następującą po tym modulację mocy doprowadzanej do „büksującego” koła. Proces ten sprawia, że pojazd przyspiesza z maksymalnym przyspieszeniem możliwym dla określonych warunków podłoża i pojazdu (nacisk koła na podłoże). Sterowanie dynamiką pojazdu (ESP, VDC) wprowadzono pod koniec lat dziewięćdziesiątych. VDC działa podobnie do ASR z dodaniem sensora tempa obrotu samochodu dokoła osi pionowej i sensora przyspieszenia poprzecznego. Zamiary kierowcy określane są przez pozycję koła kierownicy i porównanie tej pozycji z rzeczywistym kierunkiem ruchu samochodu. System ASR uruchamia następnie sterowanie dostarczaniem momentu napędowego do kół, sterowanie prędkością pojazdu i minimalizuje różnicę między kierunkiem kierownicy i kierunkiem ruchu pojazdu. W niektórych przypadkach ABS jest używany do zmniejszania prędkości samochodu w celu uzyskania pożądanego sterowania. W dzisiejszych samochodach do implementacji różnych systemów sterowania stosuje się 8, 16 lub 32 bitowe jednostki centralne. Mikrokontroler ma na płycie pamięć (EEPROM/EPROM) wejścia analogowe i cyfrowe, przetworniki analogowo-cyfrowe, modulację szerokości impulsu (PWM), funkcje timera, takie jak zliczanie zdarzeń i pomiar szerokości impulsu, priorytetyzowane wejścia a czasami nawet przetwarzanie sygnałów cyfrowych. 32-bitowego procesora używa się do zarządzania silnikiem, sterowania skrzynią biegów i poduszkami bezpieczeństwa; 16-bitowego procesora do ABS, ASR i VDC, tablicy przyrządów i klimatyzacji; 8-bitowego do sterowania siedzeniami, lusterkami i szybami. Dziś w samochodzie wyższej klasy mamy od 30 do 60 mikrokontrolerów. Oczekuje się, że rozwój będzie szedł w kierunku modularnego systemu z podsystemami mechatronicznymi typu „plug-and-play”.

Mechatronika stała się koniecznością dla zróżnicowania produktu jakim jest samochód. Ponieważ podstawy silnika spalinowego opracowano sto lat temu, różnice w konstrukcji silnika przestały już być czynnikiem różnicującym samochód. W latach siedemdziesiątych japońscy producenci samochodów udanie weszli na rynek samochodowy USA przez oferowanie małych samochodów o wysokiej jakości i niskim zużyciu paliwa. Jakość pojazdu była czynnikiem różnicującym produkt przez lata osiemdziesiąte. W latach dziewięćdziesiątych konsumenci zaczęli oczekiwać jakości i niezawodności od wszystkich wytwórców samochodów. Dziś w tym tradycyjnie mechanicznym systemie czynnikiem różnicującym produkt stały się *cechy mechatroniczne*. Ten proces różnicowania przyspieszany jest przez coraz tańszą elektronikę, wzrost zapotrzebowania rynku na innowacyjne produkty o cechach inteligentnych i przez dążenie do redukcji kosztu wytwarzania istniejących produktów przez przeprojektowanie wbudowanych elementów mechatronicznych. Przy niewielkim wzroście produkcji (2-3%) wytwórcy samochodów szukają tak zwanych cech „high-tech”, które będą różnicować ich samochody od innych. Rynek elektroniki motoryzacyjnej w Ameryce Północnej wynosił pod koniec lat dziewięćdziesiątych około 20 miliardów dolarów i oczekuje się, że w roku 2004 osiągnie 28 miliardów dolarów. Nowe zastosowania systemów mechatronicznych w świecie samochodowym to samochody półautonomiczne i w pełni autonomiczne, poszerzenie bezpieczeństwa, redukcja emisji spalin, „inteligentne” sterowanie prędkością na trasie i eliminujący hydraulikę elektromechaniczny system hamowania (brake by wire). Inne obszary rozwojowe to mechatroniczne podejście do projektowania

w bezprzewodowym połączeniu samochodów z siecią stacji i w komunikacji pojazd-pojazd. Największym potencjalnym obszarem rozwojowym wydaje się być telematyka, która łączy razem magnetofon, telefon komórkowy, nawigację, połączenie z internetem, e-mail i rozpoznawanie głosu. Oczekuje się, że na początku XXI wieku użycie elektroniki w samochodach będzie wzrastać rocznie o 6% i że funkcjonalność elektroniki w tym czasie podwoi się.

Technologią umożliwiającą tani rozwój sensorów i aktorów dla zastosowań mechatronicznych jest mikroelektromechanika (MEMS). Wiele urządzeń MEMS znajduje się już dziś w samochodach. Są to sensory i aktory poduszek bezpieczeństwa czy sensory do mierzenia ciśnienia w kolektorze ssącym. Integrowanie na tym samym chipie silikonowym urządzeń MEMS z obwodami CMOS do kondycjonowania sygnału jest kolejnym przykładem nowej technologii, która polepszy produkt mechatroniczny jakim jest samochód.

Ostatnio zastosowanie w samochodach znajduje radar. Jego milimetrowe fale wykrywają w czasie rzeczywistym położenie obiektu (innych pojazdów) w otoczeniu, odległość do przeszkody i jej prędkość. Technika ta oferuje możliwość sterowania odległością między pojazdem a przeszkodą (inny pojazd) przez zintegrowanie sensora z systemem sterowania prędkością na trasie i z ABS. System ABS i system sterowania prędkością są wzajemnie powiązane w celu osiągnięcia tych zauważalnych możliwości. Jednym z logicznych rozszerzeń zdolności do omijania przeszkód jest kierowanie półautonomiczne przy małej prędkości, kiedy to pojazd utrzymuje stałą odległość od pojazdu przed nim podczas jazdy w korku ulicznym. Planuje się, że w perspektywie 20 lat rozwój mechatroniki doprowadzi do pojazdów w pełni autonomicznych. Wiele ośrodków prowadzi badania nad rozwojem samochodu półautonomicznego z reaktywnym planowaniem toru jazdy przez uaktualnianie modelu ruchu za pomocą GPS i automatyzację procesu zatrzymywania-ruszanie. Proponowana sensoryka i system sterowania dla takiego pojazdu zawierają zróżnicowane systemy pozycjonowania globalnego (DGPS), przetwarzanie obrazu w czasie rzeczywistym i dynamiczne planowanie toru jazdy.

Przyszłe systemy mechatroniczne w samochodach przewidują niezaparowującą szybkość opartą na sensorach temperatury i sterowaniu klimatem, samoczynne równoległe parkowanie, wspomaganie parkowania tyłem, pomoc podczas zmiany pasa jezdni, elektroniczny bezpłynowy układ hamulcowy (brake-by-wire) oraz zastąpienie systemów hydraulicznych serwo-systemami elektromechanicznymi. Ponieważ rośnie liczba samochodów, nieuniknione są bardziej rygorystyczne standardy emisji gazów. Produkty mechatroniczne z dużym prawdopodobieństwem będą przyczyniać się do sprostania wyzwaniom sterowania emisją gazów i sprawnością silnika przez zapewnianie istotnej redukcji wydzielania CO, NO i HC oraz wzrost sprawności pojazdu. Oczywiście, że samochód z 30-60 mikrokontrolerami, 100 silnikami elektrycznymi, 100 kilogramami okablowania, wielką liczbą sensorów i tysiącami liniami kodu oprogramowania słusznie można zgrubnie traktować jako system mechaniczny. Jednak samochód powoli staje się mechatromatem, czyli automatem mechatronicznym.

Od hamulca mechanicznego do mechatronicznego

Innym ciekawym przypadkiem ewolucji mechatronicznej może być rozwój konstrukcji hamulca samochodowego. Skuteczne urządzenia hamulcowe od początków rozwoju konstrukcji samochodu osobowego w roku 1885 należą do najważniejszych urządzeń bezpieczeństwa w samochodzie. Muszą być absolutnie odporne na uszkodzenia i być w stanie stabilnie zatrzymać pojazd na najkrótszej drodze we wszystkich warunkach jazdy. Hamulec samochodowy może być dobrym przykładem historii sukcesu rozwoju systemu od czysto mechanicznego do mechatronicznego [BERTRAM 2002]. Przy czym pozostała niezmienną podstawowa zasada działania – przetworzenie energii ruchu w ciepło przez tarcie między dwoma ciałami.

W samochodzie z roku 1885 hamulec taśmowy z przekładnią pasową był uruchamiany ręcznie za pomocą dźwigni. Kolejne etapy rozwoju polegały wyłącznie na poprawieniu mechaniki lub hydrauliki i były motywowane wzrostem mocy, bezpieczeństwa i niezawodności. Granica czysto mechanicznie realizowanych systemów hamulcowych została osiągnięta wtedy, gdy konstruktorzy zaczęli wymagać bardziej złożonych zadań regulacyjnych oraz większego przetwarzania informacji. Wprowadzenie funkcji zapobiegającej blokowaniu kół podczas hamowania (ABS) w roku 1978 było możliwe przez uzupełnienie funkcji mechanicznych funkcjami elektronicznymi. Chodzi tu o elektroniczne sensory, elektroniczne przetwarzanie informacji (mikroprocesor) oraz elektronicznie uruchamiane hydrauliczne zawory przełączające, które, jako urządzenia wykonawcze (aktory), sterują ciśnieniem hamowania. Dopiero dzięki funkcjonalnej integracji sensorów, sterownika i aktorów zapewniona jest całkowita funkcjonalność ABS. Kolejną innowacją było w roku 2001 rozdzielenie połączenia hydraulicznego między pedałem hamulca a hamulcami kół w hamulcu elektrohydraulicznym. Znane do tej pory naciskanie pedału hamulca zastępuje się jednostką uruchamiającą, złożoną z symulatora czucia pedału i sensorów do rejestracji życzenia kierowcy. Sygnały tej jednostki i innych sensorów przenoszone są na drodze elektrycznej (by wire) do regulatora w sterowniku. W jądrze hamulca elektrohydraulicznego – centralnej mechatronicznej jednostce sterującej – interdyscyplinarne przestrzenne zgranie budowy maszyn, elektrotechniki i techniki informacyjnej pokazuje swoje największe zalety; mikrokomputer, oprogramowanie, sensory, zawory elektrohydrauliczne i pompa elektryczna pracują razem i umożliwiają całkowicie nowe, bardzo dynamiczne zarządzanie hamulcem.

W hamulcu elektromechanicznym, za którego pomocą można, z dzisiejszego punktu widzenia, opisać kolejną innowację planowaną z roku 2006, idzie się jeszcze dalej. Rezygnuje się z cylindra i przewodów hydraulicznych, zastępując je kablami elektrycznymi. Zastosowanie elektroniki zmniejsza nakłady na obsługę i oznacza rezygnację z drogiego neutralizowania płynu hamulcowego. Sensory symulatora pedału hamulca określają jak silnie chce kierowca zahamować. Sterownik przetwarza odebrane sygnały i oblicza dla każdego koła siłę z jaką klocki powinny zostać dociśnięte do tarczy hamulcowej. Moduły hamulcowe koła składają się ze sterownika elektrycznego, silnika elektrycznego i przekładni wytwarzającej siłę docisku w gnieździe hamulca. Hamulec elektromechaniczny reaguje bardzo szybko i przez

to skraca drogę hamowania. Elektroniczny pedał hamulca, jego wygodne, ergonomiczne usytuowanie i minimalne siły nacisku mogą doprowadzić do zyskania połowy sekundy (0,5 s) podczas uruchomienia hamowania, co skraca drogę hamowania ze 100 km/h o około 20%. Wyłącznie elektryczne przekazywanie sygnału sprawia, że moduł pedału można przesunąć bliżej ściany podwozia, czego nie można zrobić w hamulcu mechaniczno-hydraulicznym lub elektrohydraulicznym. Uzyskuje się przez to więcej miejsca wewnątrz pojazdu i mniejsze ryzyko narażenia w przestrzeni nóg.

Rozwój konstrukcji urządzeń hamulcowych pojazdów w ostatnich 120 latach jest wyrazem przemiany od systemu mechanicznego do systemu mechatronicznego. Wymagania dotyczące mniejszej zwłoki lub rosnącej funkcjonalności, bezpieczeństwa, komfortu, ekonomiczności i lepszej zgodności ze środowiskiem, przy równocześnie coraz krótszych cyklach produkcji, warunkują wysoki stopień integracji na płaszczyźnie systemowej i czynią mechatronikę coraz bardziej znaczącym czynnikiem przyszłych innowacji, szczególnie z punktu widzenia konkurencyjności produktów na rynku.

Podsumowanie

Za podsumowanie przedstawionej perspektywy historycznej niech posłuży, zaproponowana przez ISERMANN [2002], chronologia rozwoju systemów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych (rys. 56).

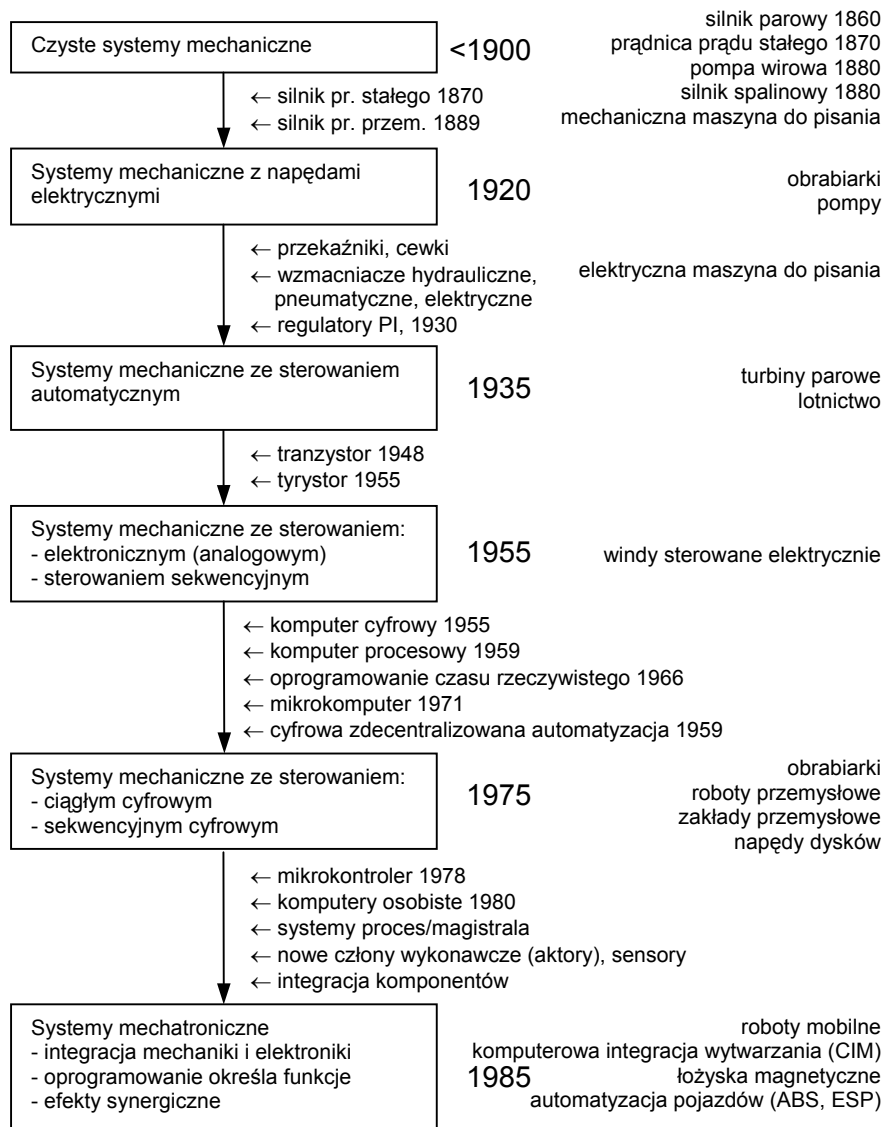
Pojęcie rozwoju mechatronicznego

Przez rozwój mechatroniczny rozumiem przebieg czasowy, w którym rośnie liczebność i różnorodność mechatronicznych systemów rzeczowych. Używając metafor biologicznych pojęcie to można rozumieć dwojako: (1) jako ontogenezę mechatroniczną i (2) jako filogenezę mechatroniczną (rys. 57).

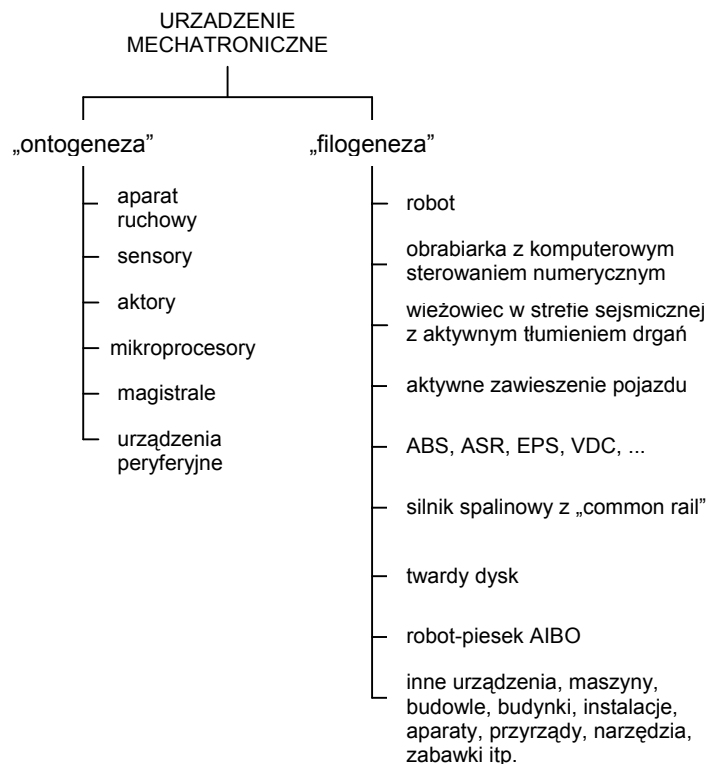
Ontogeneza i filogeneza mechatroniczna

W znaczeniu *ontogenetycznym* rozwój odnosi się do całej historii powstawania określonego urządzenia mechatronicznego. Zaczyna się od chwili jego opisanie, a sięga do chwili, w której staje się ono konkretną rzeczywistością i jest ogólnie użytkowane.

W znaczeniu *filogenetycznym* rozwój mechatroniczny jest historią powstawania całej mechatronicznej techniki rzeczowej. W tym przypadku można go nazwać *mechatronizacją*, gdy włączymy w to rozszerzanie zastosowania mechatroniki. Filogeneza mechatroniczna jest dynamicznym systemem niezliczonych ontogenez mechatronicznych. W tym sensie rozwój mechatroniczny sięga od początków mechatronicznej techniki rzeczowej, przez mechatroniczną sferę terażniejszości, aż w przyszłość. Można go ująć historiograficznie i systematyzować z różnych punktów widzenia. Przyszłe etapy filogenezy mechatronicznej można próbować przewidywać na podstawie rozpoznawalnych tendencji i prawdopodobieństwa ich wystąpienia. Za tym kryje się pytanie, czy w ogóle istnieją jakieś prawidłowości rozwoju mechatronicznego.



Rys. 56. Historyczny rozwój systemów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych



Rys. 57. Ontogeneza i filogeneza urządzenia mechatronicznego

Rozwój mechatroniki jako etap technizowania pracy

Ułatwianie pracy za pomocą techniki to proces opanowywania przez człowieka trzech podstawowych czynności związanych z pracą: (1) obróbki materiału, (2) przetwarzania energii i (3) przetwarzania informacji. Wszystko to zaczęło się od opanowania obróbki materiału w czasach prehistorycznych, a dziś osiąga swe apogeum w postaci opanowania przetwarzania informacji. Kolejne częściowe funkcje swej pracy człowiek przekazywał nośnikom maszynowym. Tabela 2 ukazuje ten proces jako kolejne etapy technizacji funkcji pracy. W tabeli tej znajduje się również czwarta podstawowa czynność związana z pracą, a mianowicie określanie jej celów. Czynność ta jest oczywiście domeną człowieka, ponieważ maszyna nie ma żadnych celów własnych.

Tab. 2. Etapy technizacji pracy

Częstkowe funkcje pracy, ich nośniki i etapy technizacji												
Funkcje		Nośniki funkcji		Zastępowanie człowieka maszyną (M)								
		u człowieka	w maszynie									
CEL	Określanie celów	umysł	umysł							?		
INFORMACJA	Przetwarzanie informacji	mózg	sterowniki, regulatory, procesory, komputery							M		
	Magazynowanie informacji	pamięć	krzywki, karty dziurkowane, dyskietki, twarde dyski							M M		
	Wykrywanie stanu otoczenia	zmysły, receptory	czujniki, sensory						M	M M		
	Oddziaływanie na stan otoczenia	mięśnie, gruczoły, efekторы	człony wykonawcze, aktory					M	M	M M		
	Transportowanie informacji	nerwy	ciągna, kable, magistrale				M	M	M	M	M	
ENERGIA	Magazynowanie energii	komórki, tkanki	akumulatory, baterie					M	M	M M		
	Transportowanie energii	ścięgna, szkieleć	ciągna, wały, kable		M	M	M	M	M	M M		
	Przetwarzanie energii	mięśnie	silniki		M	M	M	M	M	M M		
MATERIAŁ	Transportowanie materiału	ręka, plecy	podajniki, podnośniki, wózki, rurociągi, pojazdy				M	M	M	M M		
	Prowadzenie materiału i narzędzia	stawy, szkieleć, aparat ruchowy	łożyska, prowadnice, mechanizmy,			M	M	M	M	M M		
	Magazynowanie materiału	dłoń	zbiorniki, pojemniki	M	M	M	M	M	M	M M		
	Oddziaływanie na materiał	dłoń, palce	narzędzie	M	M	M	M	M	M	M M		
Etapy technizacji ⇒				1	2	3	4	5	6	7	8	9

1. Praca ręczna; 2. Praca rzemieślnicza (opanowanie oddziaływania na materiał); 3. Praca zmechanizowana (opanowanie przetwarzania energii); 4. Prosta praca maszynowa (opanowanie prowadzenia materiału i narzędzia); 5. Rozwinięta praca maszynowa (opanowanie transportu materiału do i od maszyny); 6. Rozwinięta praca maszynowa (opanowanie oddziaływania na stan maszyny); 7. Zautomatyzowana praca maszynowa (opanowanie wykrywania stanu maszyny); 8. Zautomatyzowana praca maszynowa (opanowanie magazynowania informacji do zmiany stanu maszyny); 9. Zautomatyzowana praca maszynowa (opanowanie przetwarzania informacji niezbędnej do zmiany stanu maszyny, zautomatyzowanie wnioskowania logicznego).

Historię rozwoju techniki można podzielić na dwa podstawowe okresy. Pierwszy, trwający od czasów prehistorycznych do mniej więcej połowy XX wieku, polegał przede wszystkim na technizowaniu (przenoszeniu na narzędzia, maszyny i urządzenia) podstawowych umiejętności ręcznych człowieka i energii jego mięśni.

Okres drugi, przeżywający dziś swój rozkwit, charakteryzuje się przede wszystkim technizowaniem podstawowych zmysłów i cech umysłu człowieka. Okres ten ma dwa symbole: (1) technikę komputerową, pozwalającą przenieść na maszynę to, co jeszcze niedawno było zarezerwowane dla umysłu człowieka, tj. logiczne wyciąganie wniosków; oraz (2) mechatronikę, która fizycznie realizuje te wnioski. Mechatronizacja stała się więc naturalnym etapem technizacji pracy człowieka. Powstają wyrafinowane artefakty, a właściwie *artefakty*, które przejmują w coraz większym stopniu funkcje pracy i funkcje zmysłów człowieka. Rozwój mechatroniczny sprowadza się do wbudowywania w urządzenia techniczne tradycyjnych działaniowych funkcji człowieka.

Czego oczekujemy od urządzeń mechatronicznych?

Urządzenia mechatroniczne, szczególnie roboty, są najbardziej wymownym świadectwem rozwoju naszej obecnej kultury technicznej. Budzą ciekawość dla tego co jest dziś technicznie wykonalne przez powiązanie mechaniki, elektroniki i informatyki. Wnoszą w rzeczywistość pewien powiew utopii. Prowokują emocje i skłaniają do stawiania pytań, które wychodzą poza czystą technikę, na przykład: Jak dalece można i wolno zdolności ludzkie zastąpić maszynami? Inspirują pytania dotyczące podstawowego stosunku między człowiekiem a maszyną i przez to dotyczące rozumienia nas samych i perspektyw etycznych.

Za perspektywny cel rozwoju techniki uważa się dziś urządzenia „inteligentne” i autonomiczne. Takimi są oczywiście roboty i inne urządzenia mechatroniczne. Jednak im bardziej rozszerza się zastosowanie takich urządzeń poza przemysł, tym częściej napotyka się nowe wyzwania, które powodują zmianę podejścia (paradygmatu) do wymagań, jakie stawia się urządzeniom. Coraz wyraźniej przebija się podejście, że urządzenie mechatroniczne powinno być raczej „przedłużonym ramieniem” człowieka, inteligentnym narzędziem czy nawet partnerem, a nie konkurentem w pracy. Taka wizja, obok wielu pytań o szczegóły realizacji technicznej, nasuwa również pytanie o podział pracy między człowieka a maszynę i o przyporządkowanie związanych z tym uprawnień do podejmowania decyzji. Dlatego rozważania o wymaganiach stawianych urządzeniom mechatronicznym powinniśmy zacząć od przyjrzenia się pojęciom inteligencji i autonomii.

O inteligencji mechatronicznej

Istnieje wiele podejść do wyjaśnienia i podziału pojęcia inteligencji na różne klasy [STONIER 1992]. W biologii przez inteligencję rozumie się zwykle zdolność zapewniającą jednostce przeżycie. W fizyce i chemii za warunek istnienia inteligencji uważa się stopień organizacji molekuł. Technika komunikacyjna i informatyka znają miary inteligencji związane z pojęciami entropii, ze stopniem uporządkowania wiedzy. Nauki społeczne stosują pojęcie inteligencji zbiorowej, aby opisać zdolności systemów kształcenia, gospodarek czy bibliotek. Antropocentryczne podejście do inteligencji w centrum rozważań stawia człowieka i widzi inteligencję jako zdolność człowieka, jako jądro jego kompetencji społecznej. W związku z tym podkreśla się rolę tak zwanej inteligencji emocjonalnej, w porównaniu do tradycyjnie rozumianej inteligencji intelektualnej. Ogólnie obowiązująca i akceptowana przez

wszystkich definicja prawdopodobnie nie istnieje. Pewnie nie ma takiej potrzeby. Podobnie jest zresztą z definicją informacji, co wcale, jak widać, nie przeszkadza bujnemu rozwojowi informatyki.

Wyrażenie „inteligencja robotyczna” czy „inteligencja mechatroniczna” można by uzasadnić korzyściami dla charakteryzowania pewnych bardzo pożądaných, podobnych do ludzkich, właściwości urządzeń mechatronicznych. Urządzenie mechatroniczne, na przykład robot, który miałby być dla człowieka narzędziem lub nawet partnerem, musiałoby komunikować się z człowiekiem na sensownym poziomie i powinno równie sensownie reagować. Oczywiście istnieją różne poziomy komunikacji i „rozumienia”, z których można by wyprowadzić miary tego rodzaju inteligencji. Takie stopniowane scharakteryzowanie inteligencji maszyny byłoby mniej ścisłe niż klasyczna definicja sztucznej inteligencji, podana przez TURINGA (1950), ale za to bardziej pragmatyczne i konstruktywne. W tym sensie zdolność do komunikacji i interakcji z człowiekiem stanowi podstawę antropocentrycznie uzasadnionej inteligencji mechatronicznej.

O autonomii

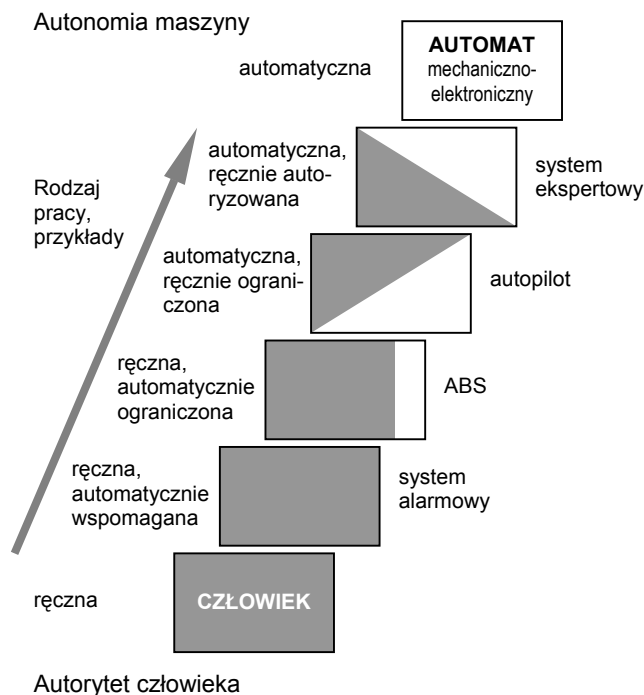
Problem przyporządkowania decyzji, a tym samym przypisania odpowiedzialności człowiekowi lub maszynie, podczas wspólnego rozwiązywania zadania, dotyka dwóch bardzo ważnych pojęć: autonomii i autorytetu. Przyjrzyjmy się bliżej różnym definicjom autonomii.

W technice systemowej pojęcie autonomii jest zdefiniowane jednoznacznie matematycznie. System techniczny jest autonomiczny wtedy, gdy tylko na podstawie samych swoich stanów wewnętrznych w chwili t_0 daje się całkowicie opisać również w przyszłości ($t > t_0$). Przykładem jest wahadło zawieszane bez zakłóceń: jeśli znamy wychylenie wahadła na początku rozważań, to daje się przewidzieć dalsze zachowanie wahadła, ponieważ przebiega ono według prawidłowości wewnętrznych, bez wpływu z zewnątrz.

Częściowo autonomiczny jest na przykład robot wtedy, gdy wyda mu się polecenie z zewnątrz, aby przemieścić się z pozycji A do pozycji B, jako że wtedy zawsze na podstawie swych wewnętrznych prawidłowości (zależności) i przez to autonomicznie może decydować o rodzaju drogi i czasowym przebiegu ruchu. Należy więc w pojedynczym przypadku scharakteryzować do czego autonomia się odnosi. Trzeba też rozróżniać stopnie autonomii. Bez wyraźnego podania warunków staje się zrozumiałe, że przez pojęcie *robot autonomiczny* każdy może rozumieć co innego.

Według każdorazowych uzgodnień co do kształtu autonomii trzeba też orientować hierarchię uprawnień do podejmowania decyzji, czyli przyporządkowanie autorytetu. Podczas automatyzacji złożonych procesów człowiek chciałby lub musi być często angażowany, przede wszystkim do podejmowania decyzji w sytuacjach krytycznych lub dotyczących bezpieczeństwa. Podział uprawnień decyzyjnych na człowieka i maszynę może być różny, w zależności od zastosowania i wymagań [GROTE 1997]. Rysunek 58 pokazuje stopień autorytetu dla różnych oczywistych

przykładów. Konkretna trudność leży w tym, że w każdym pojedynczym przypadku tę czysto jakościową klasyfikację trzeba zastąpić jasnymi, szczegółowymi i ilościowymi wskazówkami.



Rys. 58. Przepisanie autorytetu w systemach częściowo zautomatyzowanych

Perspektywy rozwoju urządzeń mechatronicznych

Rozwój mechatroniki będzie szedł coraz bardziej w kierunku urządzeń „inteligentnych”. Wzrastać będzie znaczenie oprogramowania i algorytmów. Konkretnie przetworzenie „inteligentnie” zaplanowanych akcji będzie wymagać rozszerzenia zdolności ruchowych. Na znaczeniu zyska mikrotechnika.

Przyszłe zastosowania mechatroniki można podzielić na następujące:

- Mechatronizowanie urządzeń klasycznych we wszystkich klasycznych obszarach ich użytkowania w celu zwiększenia osiągnięć, uproszczenia mechanizmów i obniżenia kosztów.
- W obszarach, w których człowiek w ogóle nie może pracować lub sam nie może pracować, np. w nanoobszarach, pod wodą, pod ziemią i w przestrzeni kosmicznej.

- Roboty i inne urządzenia mechatroniczne będą wspierać ludzi w pracach, które są niebezpieczne lub nieprzyjemne. Chodzi tu przede wszystkim o ciężkie prace w budownictwie, zadania nadzorcze w elektrowniach i instalacjach chemicznych, prace konserwacyjne w kanalizacji, sortowanie odpadów, zadania w służbie ratowniczej z automatycznymi aparatami latającymi dla celów ratowniczych i gaśniczych.
- W obszarach, gdzie nie wystarcza zręczność człowieka, jego wytrzymałość, zdolność koncentracji czy niezawodność; np. w technice operacji chirurgicznych (chirurgia małoinwazyjna) operacjach oczu, przemysłowej technice montażu, mikrotechnice. Do tego należy zaliczyć zastosowanie robotów jako pomocy w rehabilitacji medycznej w celu odtworzenia ograniczonych możliwości ruchowych i zachowania przez człowieka niezależności fizycznej.
- W obszarach rozrywki i zabawy. Natura ludzka raduje się zwykle czymś nowym i niespodziewanym. Dlatego roboty i inne urządzenia mechatroniczne spotyka się jako przedmioty zabawy, jako zabawki, jako coś co ściąga na siebie spojrzenie. Ponieważ niezawodność i cena nie są w tym przypadku najważniejszymi priorytetami, ten obszar zastosowania może być nawet pionierski dla bardziej wymagających zadań.

Metody robotyki i mechatroniki będą miały wpływ na projektowanie licznych produktów. Weźmy choćby tylko skutki w zakresie medycyny. Istnieje możliwość wytwarzania protez i implantów, które w inteligentny sposób dopasowują się do nośnika. Już dziś widać rozwiązania dla zastąpienia kończyn i stawów (protezy), dla sensorów jako implantów słuchu lub sztucznej siatkówki oraz dla sztucznych organów wewnętrznych jak pęcherz czy pompa wspomagająca pracę serca. Do tego można również zaliczyć przenośne lub implantowane elementy nadzorcze dla chronicznie chorych. Takie zastosowanie mechatroniki wydają się być mniej kontrowersyjne niż wykorzystywanie możliwości biologicznych. Użycie tak zwanych technoimplantów wywołuje mniej ograniczeń natury etycznej niż transplantacja organów zwierzęcych czy pobieranie organów od dawców. Również szanse rzeczywistej realizacji wydają się wyższe, gdy weźmie się pod uwagę trudności medyczne, koszty, czas i dyspozycyjność.

Zastępowalność człowieka przez urządzenia mechatroniczne ma więc bardzo różne aspekty. Zastępowanie części ludzkiego aparatu funkcjonalnego przez elementy mechatroniczne robi ogromne wrażenie. Można to traktować jako postęp medycyny technicznej. Wydaje się, że człowiek w swoim świecie pracy może zostać istotnie odciążony lub wspomagany przez urządzenia mechatroniczne, ale w żadnym razie nie może być zastąpiony całkowicie. W złożonych zadaniach człowiek wydaje się być niezastępowalny, przynajmniej w zakresie zdolności sensorycznych i planistycznych. Tak to wygląda dziś i prawdopodobnie jeszcze długo tak pozostanie.

Wymienione powyżej zastosowania z reguły odbiera się jako pozytywne i pożądane osiągnięcia techniczne. Nie należy jednak zapominać, że rozwój urządzeń mechatronicznych prowadzi również do urządzeń, które nie spotykają się z powszechną aprobatą. Mam tu na myśli przede wszystkim urządzenia używane dziś do celów militarnych. Można też sobie wyobrazić, że rozwój implantów technicznych dopro-

wadzi również do rozszerzenia ludzkiej sensoryki w taki sposób, że dojście do baz danych bardzo prosto zostanie po prostu przyłączone do mózgu człowieka i że wtedy telekomunikacja może umożliwić kiedyś telemanipulację człowieka. Przejście do utopijnych scenariuszy nacechowanych horrorem jest płynne.

Oczekiwania od mechatroniki i jej wspomaganie jako kluczowej nauki i techniki powinno więc następować na bardziej szerokiej płaszczyźnie. Na pierwszym planie powinna stać kooperacja między człowiekiem a maszyną, jej organizacja, forma techniczna i rozwój urządzenia mechatronicznego aż do inteligentnego narzędzia człowieka. Potencjalna korzyść dla użytkowników wydaje się być ogromna w aspekcie humanitarnym i gospodarczym.

Jeszcze w niedalekiej przeszłości przy temacie robotyki i automatyzacji na pierwszym planie stały przede wszystkim aspekty ekonomiczne i społeczne. Badania miały na celu wykazanie wad i ich unikanie. Przyjmowano, że o zalety proponowanych rozwiązań przemysł będzie się troszczył sam. Dziś główne cele takich badań leżą gdzie indziej. Chce się uchwycić i skwantyfikować szanse mechatroniki. Trudności leżą dziś raczej w ukazaniu obiecujących, godnych zainteresowania perspektyw przyszłościowych dla młodzieży, perspektyw, które wychodzą poza czyste wartości pieniężne, a stawiają mechatronikę w służbie człowieka.

Wymagania stawiane urządzeniom mechatronicznym

W interdyscyplinarnej praktyce projektowej, a taką jest niewątpliwie projektowanie mechatroniczne, można wyróżnić dwa przeciwstawne bieguny. Jednym jest etos inżynierskiej i ergonomicznej „wartości funkcjonalnej”, drugim zaś – etos estetycznej i kulturowej wartości „emocjonalnej” [ROBERTSON 1998]. Rozwój techniki mikroprocesorowej doprowadził do inkorporacji mocy obliczeniowej we wszystkie rodzaje „rzeczy”. Z jednej strony technologia informacyjna rozwija się w kierunku coraz bardziej fascynujących multimediiów, z drugiej zaś ma miejsce integracja sterowania mikroprocesorowego z tradycyjnymi układami mechanicznymi przez projektowanie urządzeń mechatronicznych. Przez zastosowanie mechatroniki i technik multimedialnych urządzenia tradycyjne zyskują nowe cechy i wartości. Budzi to zwykle najpierw podziw, ale po pewnym czasie staje się tak oczywiste, że stanowi źródło wymagań dla nowych urządzeń (tab. 3). Z drugiej strony zaś pokazuje jak można podzielić zadania między człowieka i maszynę, a właściwie jak wykorzystać to, w czym dobry jest człowiek, a w czym maszyna (tab. 4).

Tab. 3. Wymagania stawiane nowym urządzeniom [HAGE, HOFMANN, LINS 2002]

Obecna sytuacja rynkowa charakteryzuje się tym, że dzisiejsi klienci		
nie chcą już mieć żadnych ...	lecz chcą ...	symbol
opisów	poglądowości	multimedia
czasów oczekiwania	pracy w czasie rzeczywistym	real-time
pocieszeń	załatwienia sprawy	results
wyznaczonych miejsc	wszędzie	every where
wyznaczonych czasów	w każdej chwili	any time
zobowiązań kredytowych	dostępności	afforability
zasilania z sieci	pracy na baterie	battery operation
kabli	bezprzewodowo	wireless
monopolów wytwórcy	standardyzacji	standardization
prac przy maszynie	zdalnej obsługi	remote control
wizyt serwisowych	zdalnej konserwacji	tele service
jednojęzyczności	wielojęzyczności	multilingual
rzeczy przywiązanych do miejsca	rzeczy przenośnych	portability
lokalności	globalizacji	globalization
monopoli informacji	wymiany informacji	information
konkurencji	kooperacji	co-operation
sytuacji ryzyka	bezpieczeństwa	security
rozwiązań firmowych	rozwiązań rynkowych	every device
komponentów	gotowych urządzeń	all-in-one
dopasowań	kompatybilności	plug & play
wysilków	przyjemności	convenience
wiertarek	dziur	holes

Tab. 4. Porównanie człowieka z maszyną

Człowiek	Maszyna
Reaguje na ograniczony zakres bodźców	Reaguje na bodźce poza zakresem człowieka, takie jak podczerwień czy ultradźwięki
Reaguje na bodźce zmiennie	Reaguje na bodźce zawsze tak samo
Może wykrywać nieoczekiwane lub nietypowe zmiany bodźca	Słabo wykrywa nieoczekiwane lub nietypowe zmiany bodźca
Zdolny do rozumowania indukcyjnego i dedukcyjnego	Wnioskuje logicznie
Stosuje zasady i koncepcje do rozwiązywania problemów	Oferuje ograniczony zakres rozwiązań, związany ze zdefiniowanymi obszarami problemu
Ma ogromną zdolność uczenia się	Ma ograniczoną zdolność uczenia się
Stosuje doświadczenie do rozwiązywania nowych problemów	Ograniczona w stosowaniu doświadczenia
Ma wysoce adaptacyjne odpowiedzi fizyczne	Ma ograniczone odpowiedzi fizyczne, zdefiniowane przez strukturę
Wielofunkcyjny	Ma wyspecjalizowane funkcje
Ma ograniczoną wytrzymałość	Silna, potężna, mocna
Łatwo się męczy i traci koncentrację	Nie męczy się i nie traci koncentracji
Bywa roztargniony	Nie jest w stanie być roztargniona
Ma ograniczony zakres i dokładność wyszukiwania i pozyskiwania informacji	Wyszukuje i pozyskuje informację wysoce skutecznie, dokładnie i niezawodnie
Ma słabą zdolność długiego przechowywania informacji	Ma dobrą zdolność długiego przechowywania informacji

Cele i granice rozwiązań mechatronicznych

Celami rozwiązań mechatronicznych są [PAHL i inni 2002]:

- Realizowanie nowych funkcji.
- Poprawa sposobów zachowania się systemu przez sterowanie lub regulację bez ingerencji z zewnątrz.
- Rozszerzenie granic zastosowania.
- Samoczynne nadzorowanie systemu i/lub diagnostyki uszkodzeń.
- Osiągnięcie integracji struktury w małej przestrzeni.
- Możliwość dołączenia podsystemów mechatronicznych jako sprawdzalnych podzespołów lub zespołów.
- Poprawa pewności działania.

Ograniczeniami rozwiązań mechatronicznych mogą być [PAHL i inni 2002]:

- Zbyt wysoka temperatura otoczenia pracy lub obciążenie mechaniczne, np. drgania, które szkodzą komponentom elektronicznym. Wtedy te ostatnie nie dają się zintegrować.
- Niemożliwość lub niecelowość napraw. Wymagana jest wymiana systemu mechatronicznego lub jego komponentu.
- Zbyt wysoki stosunek ceny do osiągnięć w danej sytuacji rynkowej, gdyż określone sensory i aktory, albo cały system są (jeszcze) za drogie.

Główne cechy projektowania mechatronicznego

Metodyki i środowiska projektowe, które systematyzują proces rozwoju produktów mechatronicznych, używają różnych domen wiedzy inżynierskiej. Zawierają harmonogramy, które łączą etapy pracy lub stadia rozwoju, reguły i strategie skutecznej realizacji z punktu widzenia zasobów oraz metody i narzędzia wspierające projektowanie; krótko mówiąc – modele projektowania mechatronicznego. Modele te narodziły się z charakterystycznych cech mechatroniki i projektowania mechatronicznego. Dlatego zanim przejdę do przedstawienia tych modeli, spróbuję przybliżyć dwie główne cechy projektowania mechatronicznego: dążenie do synergii i kluczową rolę sterowania.

Dążenie do synergii

Najbardziej charakterystyczna cecha mechatroniki i projektowania mechatronicznego wydaje się być opisywana przez pojęcie synergii. Słowo *synergia* zaczyna pełnić rolę klucza do szkatułki z mechatroniką. Problem w tym, że dotychczas znacznie lepiej wiemy, a właściwie chcemy wiedzieć, jak ta szkatułka po otwarciu powinna wyglądać (co w niej powinno być), niż jak ją otworzyć; znacznie więcej wiemy o tym czym jest synergia, niż o tym jaka droga do niej prowadzi. Dotychczasowe publikacje, poruszające zagadnienie synergii w mechatronice, zajmują się więcej analizą urządzeń wykazujących cechy synergetyczne niż syntezą urządzeń o takich cechach. Dlatego celowe wydaje się bliższe przyjrzenie się zagadnieniu synergii z punktu widzenia syntezy, a więc projektowania mechatronicznego. Rozważania o dążeniu do synergii podzielę na dwie części. W pierwszej pokażę dwa konkretne przykłady rozumienia synergii w mechatronice. W drugiej zajmę się ogólnym znaczeniem pojęcia *synergia* i *synergetyka* jako nauki o samoorganizacji. Na koniec zastanowię się nad pytaniem: Czy samoorganizacja może być zasadą projektowania urządzeń mechatronicznych?

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.” Przyjrzyjmy się bliżej dwu urządzeniom, w których uzyskano nowy, nieosiągalny dotychczas zestaw charakterystyk.

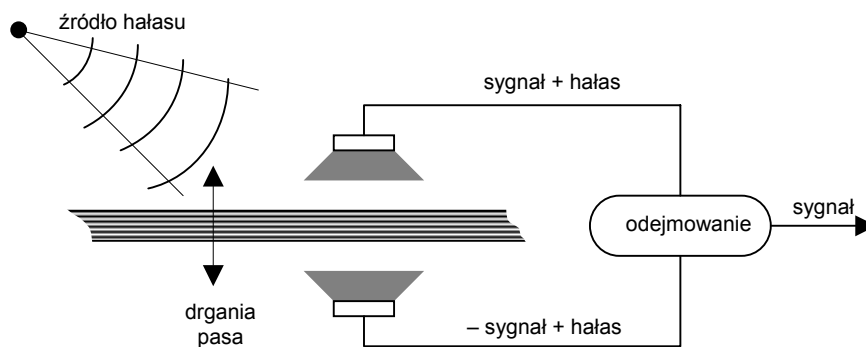
Przykład 1: miernik napięcia pasa

Podczas montażu silnika spalinowego ważne jest właściwe napięcie różnych pasów, służących do napędu wałka rozrządu i różnych akcesoriów. Pasy zbyt luźne będą się ślizgać i zużywać szybciej; a jeżeli są to pasy zębate, to może wystąpić przeskakiwanie na zębach kół. Pasy napięte zbyt mocno spowodują zaś nadmierne zużycie łożysk kół pasowych.

Tradycyjne napinanie pasów na linii montażowej silnika polega na tym, że operator ręcznie ustala wielkość ugięcia pasa za pomocą urządzenia dźwigniowego, podobnego w działaniu do klucza dynamometrycznego. Im większe napięcie pasa, tym mniejsze jego ugięcie. Napinanie za pomocą tego tradycyjnego urządzenia prowadzi jednak do dużych odchyłek, dochodzących nawet do 20% napięcia nominalnego. Powód: ugięcie pasa zmienia prawdziwą wielkość mierzoną i tarcie w miejscu styku dźwigni z pasem.

Do poradzenia sobie z tym problemem pomiarowym zaprzęgnięto elektronikę [HEWIT 1996]. Wiadomo, że gdy spowodujemy drgania pasa, to ich częstotliwość będzie funkcją napięcia pasa – mocniej napięty drga z wyższą częstotliwością własną. Stało się to podstawą działania nowego urządzenia, pozwalającego znacznie dokładniej ustalić napięcie pasa. Operator po prostu uderza silnie w pas, np. śrubokrętem, a mikrofon, trzymany obok pasa, odbiera drgania akustyczne. Prosty obwód elektryczny odfiltruje hałas, nadaje sygnałowi kształt prostokątny i zlicza te prostokąty w czasie, aby określić częstotliwość. Ta z kolei idzie do mikroprocesora, który ma w swej pamięci: (1) długość pasa, (2) jego masę jednostkową, a także (3) równanie wiążące napięcie z częstotliwością. Mikroprocesor oblicza, porównuje i podaje wynik.

Problemem do pokonania był hałas otoczenia w montażowni silnika. Hałas ten może kompletnie przydusić mały sygnał akustyczny z drgającego pasa. Rozwiązaniem było użycie dwóch mikrofonów, ustawionych naprzeciwko (rys. 59). Sygnały z tych mikrofonów są wtedy przesunięte w fazie o 180° . Wzajemne odjęcie sygnałów likwiduje hałas otoczenia i pozostawia czysty sygnał z pasa.

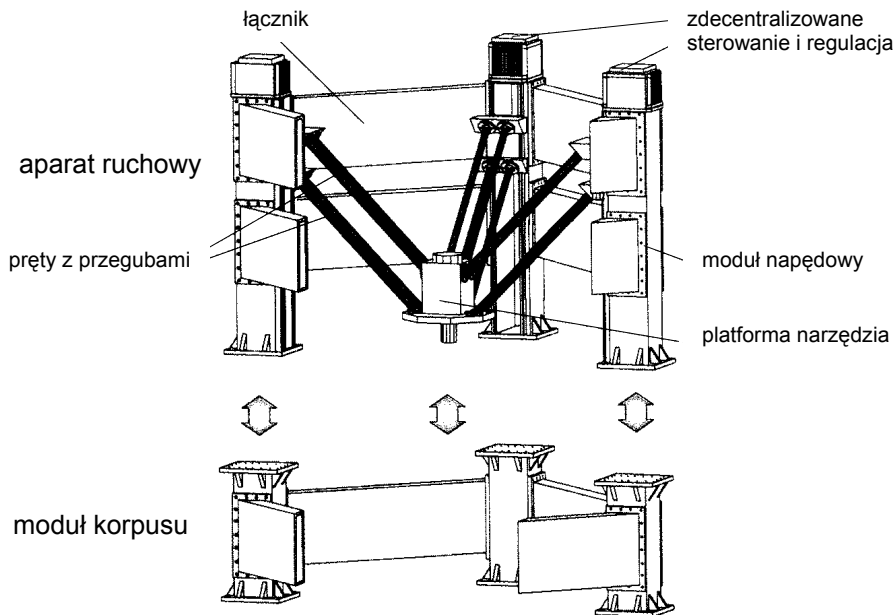


Rys. 59. „Gaszenie” hałasu otoczenia w mierniku napięcia pasa

Przykład 2: obrabiarka o kinematyce prętowej

Napędy w klasycznych obrabiarkach powiązane są zwykle w sposób szeregowy. Napęd główny napędza jakiś suport, na tym suportcie znajduje się kolejny napęd, który napędza następny suport itp. Wadą takiego powiązania napędów (jeden napęd niesie drugi) są duże ruchome masy i wynikające stąd ograniczenia dynamiki tego napędu, który niesie inny napęd.

Nowa koncepcja obrabiarek, pozbawiona tej wady, wykorzystuje znany w robotyce mechanizm STEWARTA. Polega ona na powiązaniu napędów liniowych (np. wrzecziona ze śrubą toczną) z mechanizmami łącznikowymi. Powstają w ten sposób nowe maszyny, które pokazują, że granica między obrabiarką a robotem staje się płynna. Przykładem może być koncepcja LINAPOD, modułowa koncepcja maszyn o kinematyce prętowej, opracowana w Instytucie Techniki Sterowania Obrabiarek Uniwersytetu w Stuttgarcie (rys. 60). Koncepcja ta istotnie różni się od koncepcji maszyn konwencjonalnych. Charakteryzuje się przy tym dużą dokładnością trajektorii przy równocześnie wysokiej prędkości ruchu po tej trajektorii.



Rys. 60. Modułowa, trójosiowa obrabiarka z równoległobokami prętowymi i kinematyką kolumnową

Koncepcja LINAPOD polega na następujących założeniach:

- zastąpieniu napędów szeregowych napędami równoległymi (żaden napęd nie niesie innego, dalszego napędu), co redukuje masy ruchome;
- zastosowaniu bezpośrednich napędów liniowych i elektromechanicznych, co pozwala łatwo spełnić różne wymagania procesowe i dynamiczne;

- powiązaniu napędów liniowych z korpusem, zamiast napędów w prętach, co usuwa źródła ciepła w prętach i duże podatności wewnątrz prętów, ponadto powoduje, że siła napędzająca jest wtedy, ogólnie biorąc, mniejsza niż siła w pręcie (wektorowe rozłożenie siły w pręcie na siłę napędową i siłę w łożysku).

Koncepcja ta może być podstawą budowy różnych maszyn, takich jak: centra obróbcze do skrawania z dużą prędkością; maszyny dla małych sił procesowych (obróbka laserowa, cięcie strumieniem wody); maszyny do transferu części w liniach czy maszyny do zadań ogólnych w technice robotycznej.

Przedstawione przykłady ukazują niektóre sposoby prowadzące do synergii rozumianej jako pojawienie się nowych, dotychczas nieosiągalnych charakterystyk urządzenia. Sposoby te wynikają nie tyle z bezpośredniego zastosowania elektroniki, ile raczej z zastosowania nowego sposobu myślenia, które zostało umożliwione przez rozwój elektroniki, techniki mikroprocesorowej i techniki sterowania. Takie rozumienie synergii jest jednak rozumieniem analitycznym, wskazującym prawie wyłącznie na jej skutki a niepokazującym jej przyczyn. Aby pokazać przyczyny, powinniśmy sięgnąć do innego, pozatechnicznego rozumienia synergii, opartego na pojęciu samoorganizacji. W dojściu do tego rozumienia pomoże spojrzenie na niektóre cechy maszyn jak na podobne cechy roślin i zwierząt.

Pewne spojrzenie na maszyny, rośliny i zwierzęta

Jest to spojrzenie zaproponowane przez HAKENA [1993]. Według niego maszyny są obiektami (rzeczami) o następujących cechach: (1) są wytworzone przez człowieka; (2) są skonstruowane przez człowieka, by służyły określonym, szczegółowym celom; (3) funkcjonowanie maszyn opiera się na prawach fizyki, szczególnie mechaniki; (4) są budowane w celu ułatwienia lub zastąpienia pracy ludzkiej i do wykonywania określonych funkcji. Ta ostatnia cecha jest niezbędną, ponieważ inaczej dzieła artystyczne mogłoby być interpretowane jako maszyna.

W przeciwieństwie do powyższych obiektów, budowanych przez człowieka, mamy w świecie ogromną różnorodność istot, które można scharakteryzować następująco: (1) nie są wytworzone przez człowieka; (2) służą określonym szczegółowym celom; (3) opierają się na prawach fizyki; (4) spełniają funkcje.

Co to są za obiekty? Rozważmy w tym celu poszczególne powyższe punkty.

1. Rośliny i zwierzęta na pewno nie są wytworzone przez człowieka.
2. Ich części (organy) służą szczegółowym celom: przede wszystkim przeżyciu rośliny czy zwierzęcia (dostarczaniu pożywienia). Szczególnie w przypadku zwierząt organy umożliwiają poruszanie się podczas szukania pożywienia czy partnerów seksualnych itd. Umożliwiają postrzeganie i rozpoznawanie otoczenia itd.
3. Panuje powszechna zgoda, że funkcjonowanie zwierząt i roślin ostatecznie opiera się nie na żadnym witalizmie, ale na prawach fizyki. Postać zwierząt i w dużym stopniu również roślin nie jest określona specyficznymi czynnikami wewnętrznymi, ale tym, że zwierzęta i rośliny „znajdują” swoją strukturę i swoje funkcje za pomocą środków samoorganizacji.

Tabela 5 porównuje maszyny z roślinami i zwierzętami według powyższych kryteriów. To porównanie prowadzi nas do pytania: Co to jest samoorganizacja i czy dałoby się ją stosować jako zasadę konstrukcyjną dla maszyn?

Tab. 5. Porównanie maszyn z roślinami i zwierzętami

Punkt widzenia	maszyny	rośliny zwierzęta
Czy są wytworzone przez człowieka?	tak	nie
Czy ich części (organy) służą szczegółowym funkcjom?	tak	tak
Czy ich funkcjonowanie opiera się na prawach nauk przyrodniczych?	tak	tak
Czy spełniają funkcje?	tak	tak

Synergetyka jako teoria samoorganizacji

W słowniku KOPALIŃSKIEGO [1970], pod hasłem *synergia*, czytamy:

współdziałanie, kooperacja czynników, skuteczniejsza niż suma ich oddzielnych działań (por. antagonizm, symbioza). || **synergetyczny, synergiczny, synergistyczny** (np. czynnik, narząd, mięsień, lek, trucizna) współdziałający z innym podobnym (a. działającym w grupie podobnych) i wzmagający jego (ich) działanie, skuteczność. || synergizm staroż. chrześc. doktryna teol., wg której do zbawienia albo naprawy moralnej człowieka niezbędne jest współdziałanie łaski bożej i woli ludzkiej.

Z leksykonu Brockhousa [1984] możemy się dowiedzieć, że synergia jest wzajemnym działaniem różnych sił, czynników lub organów w celu osiągnięcia czegoś uzgodnionego (np. wspólne działanie mięśni podczas ruchów ciała); także wynikająca stąd całkowita siła.

Od kilkunastu lat Springer wydaje serię poświęconą synergetyce. Na wewnętrznej stronie okładki każdego tomu tej serii można znaleźć następującą definicję synergetyki [HAKEN 1993]:

Synergetyka, interdyscyplinarny obszar badań, zajmuje się współpracą poszczególnych części systemu, który produkuje makroskopowe struktury przestrzenne, czasowe lub funkcjonalne. Obszar ten zajmuje się zarówno procesami deterministycznymi jak i stochastycznymi.

Z definicji tej wynika jednoznacznie, że są to struktury powstające samoistnie, produkowane poprzez samoorganizację. W świecie nieożywionym i ożywionym istnieją liczne systemy o tego rodzaju cechach. Przykładami mogą być płyny w ruchu, kiedy to powstają bardzo różnorodne struktury formowane spontanicznie; niektóre reakcje chemiczne mogą wywoływać makroskopowe wzory przestrzenno-czasowe, takie jak ruchome pierścienie lub spirale; biologia wprost obfituje w struktury samoorganizujące się; społeczeństwo może być interpretowane jako samoorganizująca się struktura.

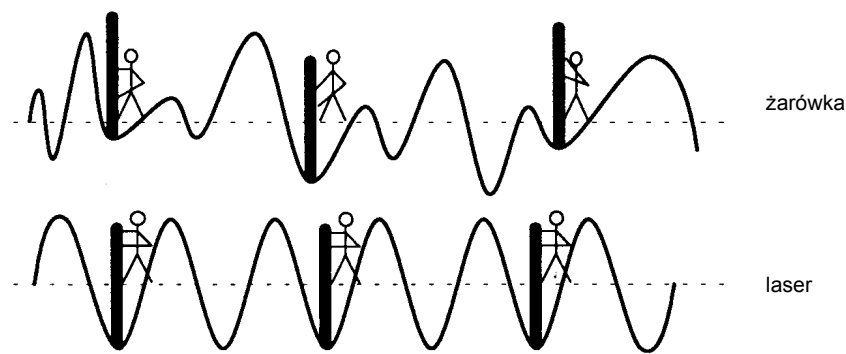
Czy samoorganizacja może być zasadą projektowania urządzeń mechatronicznych?

Odpowiedzi na tak postawione pytanie może dostarczyć przykład znanego urządzenia, jakim jest laser. Jest to chyba najpowszechniej znany przykład tworzenia struktury przez samoorganizację. Od tradycyjnych lamp z wyładowaniami gazów odróżnia się tym, że ma dwa lustra. Lustra te troszczą się o to, aby fale świetlne pozostawały możliwie długo w lampie, zanim zostaną wypromieniowane przez lustro częściowo przepuszczalne. Fale świetlne zmuszają pobudzone świecące elektrony do wzajemnych drgań i, przez to, do wzmacniania fali, aż oddadzą one fali całą swą energię. Fale o różnorodnej częstotliwości konkurują wzajemnie, aby przejąć energię elektronów. Te ostatnie jednak „uprzywilejowują” fale, które są najbliższe energii własnemu „wewnętrzznemu taktowi tańca”. Uprzywilejowana fala jest wtedy lawinowo wzmacniana i w końcu uzyskuje przewagę. Przyjmuje rolę czynnika porządkującego, rolę „regulatora”, i zmusza wszystkie nowo pobudzone elektrony do współdrżania w tym samym takcie. HAKEN opisuje to tak [1986]:

Aby elektrony drgały równomiernie w takcie, musi istnieć *regulator*, mianowicie fala świetlna. Fala świetlna powstaje jednak dopiero przez równomierne drżanie elektronów. Wygląda to tak, jakbyśmy musieli zatrudnić wyższą moc, która najpierw stworzy stan porządku, aby ten następnie mógł się utrzymać sam z siebie. Ale, jak właśnie widzieliśmy, to nie jest tak. Przede wszystkim ma miejsce pewien rodzaj *współzawodnictwa*, pewien *proces selekcji*. Wszystkie elektrony stają się przy tym niewolnikami pewnej określonej fali. Interesujące jest przy tym, że początkowo wytwarzane są przez elektrony, czysto przypadkowo i spontanicznie, różne fale – potem jednak, na podstawie zasady współzawodnictwa, są wybierane, selekcjonowane. Mamy tu typową dla synergetyki *wzajemną grę między przypadkiem i koniecznością*, przy czym „przypadek” przedstawiany jest przez spontaniczne wypromieniowywanie, podczas gdy „konieczność” ucieleśniana jest przez nieubłąganą zasadę współzawodnictwa.

Rysunek 61 obrazuje różne procesy podczas powstawania fal świetlnych w żarówce i w laserze. Ludziki, uzbrojone w kije, stojąc nad kanałem pobudzają powierzchnię wody (tworząc fale) przez zanurzanie kijów. Jeżeli czynią to niezależnie od siebie, to powstaje „dziko” poruszająca się powierzchnia, co odpowiada fali świetlnej w żarówce. Podczas pobudzania równomiernego powstaje właśnie równomierna fala wodna, analogicznie do spójnego światła laserowego.

Tego rodzaju samoorganizację próbuje się dziś wykorzystać w procesach produkcyjnych tworząc pojęcie fabryki fraktalnej [WARNECKE 1999]. Porównanie powyższego modelu z procesami i zdarzeniami w fabryce jest bowiem zadziwiające. Wydawać by się mogło, że tradycyjna organizacja produkcji funkcjonuje zgodnie z zasadą spójności. Tak, ale – i na tym polega decydująca różnica – w odpowiedzi na centralne rozkazy. Ta centralnie sterowana spójność funkcjonuje dość dobrze (ale krótkotrwale) na przykład na wieloosobowej łodzi wioślarskiej ze sternikiem. Realność fabryki odpowiada jednak raczej obrazowi żarówki – nietaktowanym (nieskoordynowanym) pojedynczym czynnościom. Wizja fabryki przyszłości powinna więc opierać się na zasadzie samoorganizacji. Wszystkie elementy fabryki działają razem, kierowane jedynie przez parametry porządkujące, i produkują w ten sposób ekonomiczne wyjście (pożądany produkt).



Rys. 61. Analogia do samoorganizacji w laserze

Czy i jak tego rodzaju samoorganizację można powszechnie wykorzystać do projektowania i konstruowania urządzenia mechatronicznego? Co zrobić, aby wszystkie elementy urządzenia działały razem, kierowane jedynie przez parametry porządkujące, i produkowały w ten sposób ekonomiczne wyjście (pożądane zachowanie się maszyny)? Jak zinterpretować i skonkretyzować technicznie w maszynie konstytutywne pojęcia (zasady) synergetyki, takie jak: czynnik porządkujący, współzawodnictwo, proces selekcji, przypadek, konieczność? Przykład lasera pokazuje, że jest to możliwe.

Poszukiwanie odpowiedzi na tego rodzaju pytania może być fascynującym wyzwaniem badawczym mechatroniki. Przekonują o tym choćby arcyciekawe rozważania HAKENA[1993], zatytułowane *Are Synergetic Systems (Including Brains) Machines?* Były one podstawową inspiracją do tych rozważań o synergii z pozycji mechatroniki.

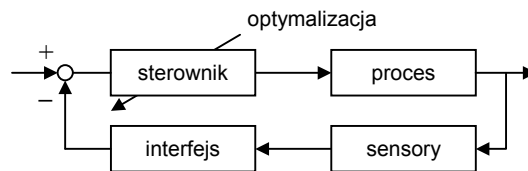
Podsumowanie

Spróbowałem przedstawić przykłady i możliwości rozumienia istoty mechatroniki i projektowania mechatronicznego za pomocą pojęcia synergii. Zacząłem od przykładów, w których przez synergię rozumie się uzyskanie dotychczas nieosiągalnego zestawu charakterystyk urządzenia. Ujęcie takie pokazuje objawy synergii, a nie jej przyczyny. W takim ujęciu mechatronika jawi się jako synergistyczna kombinacja czy synergiczna integracja cech urządzenia, które powstają przez interdyscyplinarne ocenianie i komunikowanie się.

Można jednak spojrzeć na synergię inaczej. Nie na to jak się ona objawia, lecz na metodę, która do niej prowadzi. Jest to spojrzenie na synergię (synergetykę) jako teorię samoorganizacji. Takie spojrzenie może stać się istotą syntezy mechatronicznej, wprowadzającej konstytutywne pojęcia synergetyki, takie jak czynnik porządkujący („regulator”), współzawodnictwo, proces selekcji, przypadek, konieczność. Przykład lasera pokazuje, że tego rodzaju synteza jest możliwa.

Rola sterowania w mechatronice

Jedna z definicji projektowania mechatronicznego mówi, że „projektowanie mechatroniczne zajmuje się integracją i optymalnym projektowaniem systemu mechanicznego i wbudowanego w niego systemu sterowania” [van AMERONGEN 2002]. Z definicji tej wynika, że system mechaniczny jest rozszerzony o komponenty elektroniczne w celu uzyskania lepszych osiągnięć (charakterystyk), większej elastyczności lub choćby tylko w celu redukcji kosztów. W wielu przypadkach elektronika jest obecna w postaci wbudowanego systemu sterowania, opartego na komputerze. Nie oznacza to automatycznie, że każdy sterowany system mechaniczny jest systemem mechatronicznym, ponieważ w wielu przypadkach sterowanie jest po prostu tylko dodane do systemu mechanicznego w sekwencyjnej procedurze projektowania. Prawdziwe podejście mechatroniczne wymaga, aby nastąpił optymalny wybór z punktu widzenia dyscyplin tworzących mechatronikę. W automatyce projektowanie optymalnego systemu sterowania jest znane od dawna, a dla systemów liniowych istnieją metody standardowe. Problem optymalizacji formułuje się następująco: Dany jest proces, który ma być sterowany, i dany jest wskaźnik osiągnięć (performance index, np. funkcja kosztu); należy znaleźć optymalne parametry regulatora, czyli takie, przy których funkcja kosztu będzie minimalizowana. W przypadku sterownika ze sprzężeniem zwrotnym od stanu i kwadratową funkcją kosztu, optymalne wzmocnienia sterownika można znaleźć za pomocą standardowego oprogramowania (np. Matlab) do projektowania sterownika (rys. 62).

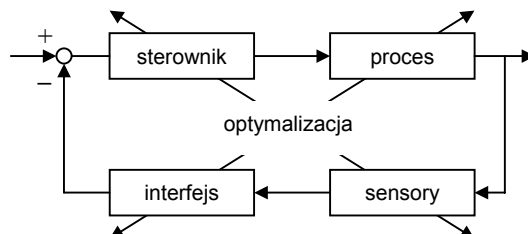


Rys. 62. Optymalizacja sterownika

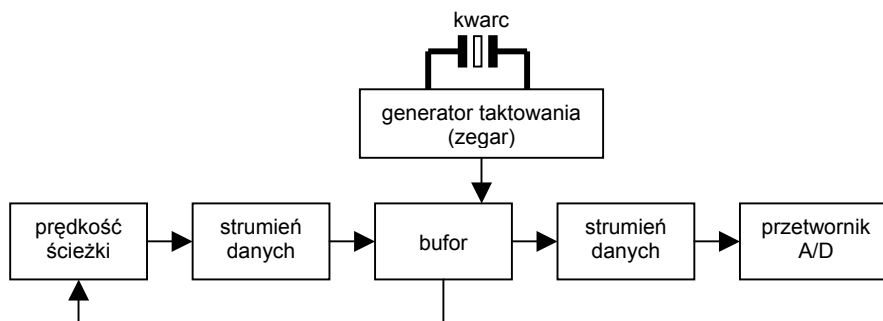
Podejście mechatroniczne polega na tym, że optymalizowany powinien być nie tylko sam sterownik, lecz cały system, a właściwie system jako całość. W idealnym przypadku powinno się optymalizować jednocześnie wszystkie komponenty systemu – sam proces, sterownik, sensory i aktory (rys. 63). Ogólnie biorąc jest to niemożliwe, problem jest bowiem źle zdefiniowany. Dlatego rozбивa się go na mniejsze problemy, które można optymalizować oddzielnie. Następnie te zoptymalizowane rozwiązania cząstkowe wiąże się ze sobą i ocenia się cały system. Przez końcowe dopasowanie niektórych części systemu dochodzi się do rozwiązania podoptymalnego.

W latach rozkwitu tradycyjnych gramofonów do uzyskania stałej liczby obrotów płyty winylowej używano tachometrycznego sprzężenia zwrotnego w połączeniu z lekkim talerzem, na którym leżała płyta. Ale rzeczywiście nową konstrukcją stał się odtwarzacz płyt kompaktowych. Zamiast utrzymywania stałej liczby obrotów dysku

(stałej prędkości kątowej), celem stało się utrzymywanie stałej prędkości wzdłuż ścieżki dysku (stałej prędkości obwodowej). Oznacza to, że dysk obraca się wolniej, gdy odczytuje ścieżki o większej średnicy. Odczytywane bity są magazynowane elektronicznie w buforze, z którego pobierane są do przetwornika cyfrowo-analogowego, sterowanego przez kryształ kwarcu (rys. 64). Pozwala to uzyskać bardzo stałe tempo przekazywania bitów i eliminuje wszystkie słyszalne wahania prędkości dysku. Takie osiągi nie byłyby możliwe za pomocą tylko czysto mechanicznego urządzenia, nawet gdyby zostało ono wyposażone w dobry system regulacji prędkości. Pętla zamknięta nie musi spełniać wysokich wymagań. Wystarczy, że będzie zapobiegać przepełnieniu lub niedopełnieniu bufora. Wysoką dokładność zapewnia bowiem pętla otwarta, sterowana kryształem kwarcu.



Rys. 63. Optymalizacja wszystkich komponentów systemu jednocześnie

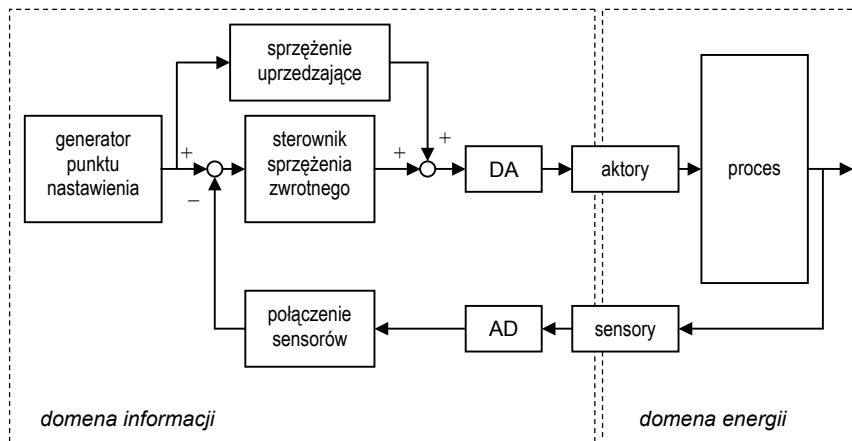


Rys. 64. Kombinacja sterowania w obwodzie zamkniętym i sterowania w obwodzie otwartym w odtwarzaczu CD

Elastyczność wprowadzona przez połączenie mechaniki precyzyjnej i sterowania elektronicznego umożliwiła rozwój odtwarzaczy CD-ROM 50 razy szybszych niż oryginalne audio CD. Do takiego nowego rozwiązania niezbędny był nowy sposób myślenia. Z drugiej strony odtwarzacze CD są ciągle wymyślnymi urządzeniami mechaniki precyzyjnej. Żadne urządzenie z elektroniczną pamięcią półprzewodnikową nie może konkurować już ekonomicznie z opto-mechanicznymi możliwościami magazynowania bitów przez CD i ich następców, czyli DVD. Ale to się może bardzo szybko zmienić.

Kluczowe elementy sterowanego systemu mechatronicznego

Już z samej definicji system mechatroniczny ma część mechaniczną – aparat ruchowy – oraz część elektroniczną (w wielu przypadkach wbudowany system komputerowy). Ta ostatnia daje systemowi tak zwaną inteligencję. W części mechanicznej główną rolę odgrywa energia, natomiast w części elektronicznej dominuje przetwarzanie informacji. Sensory przetwarzają ruch mechaniczny w sygnały elektryczne, gdzie ważna jest tylko zawartość informacji, lub nawet w czystą informację w postaci cyfr (jeżeli to konieczne, przez przetwornik AD). Wzmacniacze energii przetwarzają sygnały w modulowaną energię. W większości przypadków zasilanie energetyczne jest elektryczne, ale możliwe są również także inne zasilania, jak hydrauliczne czy pneumatyczne. Sterowany mechaniczny aparat ruchowy zawiera więc konstrukcję mechaniczną, jeden lub więcej aktorów do generowania pożądanego ruchu oraz sterownik, który steruje aktorami na podstawie dwóch sprzężeń (rys. 65): (1) sensorowego sprzężenia zwrotnego feedback), oraz (2) bezsensorowego sprzężenia uprzedzającego (feedforward).



Rys. 65. Kluczowe elementy sterowania systemu mechatronicznego

Zintegrowane modelowanie konstrukcji mechanicznej i sterownika

Podczas projektowania systemu mechatronicznego ważne jest, aby zmiany w konstrukcji i sterowniku oceniać równocześnie. O ile właściwy sterownik pozwala zbudować taną konstrukcję, o tyle źle skonstruowany system mechaniczny nigdy nie będzie w stanie uzyskać dobrych osiągnięć przez dodanie wymyślnego sterownika. Dlatego we wczesnych etapach projektowania ważny jest właściwy wybór cech mechanicznych potrzebnych do uzyskania dobrych osiągnięć sterowanego systemu. Z drugiej strony wiedza o możliwościach sterownika do kompensowania niedoskonałości mechanicznych może pozwolić na zbudowanie taniej konstrukcji mechanicznej. Dlatego we wczesnym stadium projektowania dostępny powinien być prosty model, który odsłoni czynniki ograniczające osiągi systemu. Ciągłe istnieje luka między oprogramowaniem stosowanym do modelowania i symulacji konstrukcji mechanicznych a oprogramowaniem używanym do projektu sterownika. Do bada-

nia właściwości mechanicznych inżynierowie mechanicy używają oprogramowania z zakresu elementów skończonych. Dopiero po redukcji do modeli niskiego rzędu (analiza modalna) modele te mogą być używane do projektowania sterownika. Z drugiej strony, typowe oprogramowanie z zakresu sterowania i regulacji nie wspiera procesu projektowania mechatronicznego. Używane w procesie modelowania funkcje przenoszenia (transmitancje) i opisy przestrzeni stanów często są oderwane od fizycznych parametrów konstrukcji mechanicznej. Potrzebne są więc narzędzia, które pozwolą modelować systemy mechatroniczne w taki sposób, że:

- zachowają w modelu dominujące parametry fizyczne (jak masa i dominująca sztywność),
- zapewnią równocześnie interfejs do projektowania sterownika,
- pozwolą automatykom używać narzędzia do projektowania i symulacji sterownika.

Ważnym narzędziem do oceny systemu mechatronicznego jest symulacja. Większość programów do symulacji, jak Simulink, stosuje reprezentację w postaci diagramów blokowych i nie wspomaga dostatecznie modelowania fizycznego. Nie pozwala bowiem na bezpośrednie dostrojenie fizycznych parametrów konstrukcji mechanicznej i parametrów sterownika w taki sposób, jak wymaga tego maksyma projektowania mechatronicznego. Ostatnio dostępne stały się programy, które pozwalają na modelowanie w różnych domenach fizycznych. Używają one podejścia obiektowego, pozwalającego na modelowanie hierarchiczne i ponowne używanie modeli. Rząd komputacji jest ustalany tylko przez powiązanie podsystemów. Przykładami takich programów są 20-sim, CAMAS czy Dymola [MROZEK 2002].

Projektowanie systemu mechatronicznego różni się od klasycznego projektowania sterownika podejściem całościowym. Podejście to można rozważać jako optymalizację wszystkich komponentów systemu równocześnie, mimo że nie ma żadnych algorytmów, aby to robić automatycznie. W praktyce problem ten jest często rozdzielany na mniejsze problemy, które mogą być optymalizowane. Po integracji wszystkich rozwiązań cząstkowych otrzymuje się system podoptymalny, który może być następnie optymalizowany przez ponowne dostrojenie różnych części, biorąc pod uwagę już osiągnięte przejściowe projekty całego systemu. W celu zoptymalizowania systemu jako całości pożądanym jest, aby część mechaniczna (masowo-energetyczny aparat ruchowy) i część przetwarzająca informację (sterownik) mogły być symulowane i dostrajane równocześnie. Podstawowe parametry mechaniczne, takie jak masy i podatności, muszą zaistnieć już w symulacjach sterowanego systemu.

Projektanci-mechatronicy powinni ciągle być świadomi faktu, że rozwiązania można znaleźć w różnych dziedzinach wiedzy. Nie każdą niedoskonałość mechaniczną można łatwo skompensować sterowaniem. Dobry projekt mechaniczny może być łatwiejszy i tańszy do osiągnięcia. Z drugiej strony dobry sterownik może zapewnić pożądaną osiągi znacznie łatwiej i taniej niż złożona konstrukcja mechaniczna. W niektórych przypadkach przez kombinację mechaniki i elektroniki można uzyskać nawet takie osiągi, które nigdy nie byłyby możliwe bez maksymy projektowania mechatronicznego.

To samo obowiązuje w przypadku sensorów. Każdy sensor powinien być wyposażony w filtr do usuwania zakłóceń z pomiarów. Ale jeśli połączymy kilka sensorów ze sobą, to ich powiązanie w algorytmie filtru Kalmana powinno korzystać z dostępności danych surowych.

Podsumowanie

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, wymagające 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 mechanicznej 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 przyruchowego, nie należy zaprzestawać prób likwidacji źródeł nieliniowości w elementach mechanicznych. Dlatego dla sukcesu projektowania mechatronicznego istotna jest komunikacja między wszystkimi projektantami i przejrzystość decyzji projektowych w różnych domenach.

Modele projektowania mechatronicznego

Integracja modeli domenowych

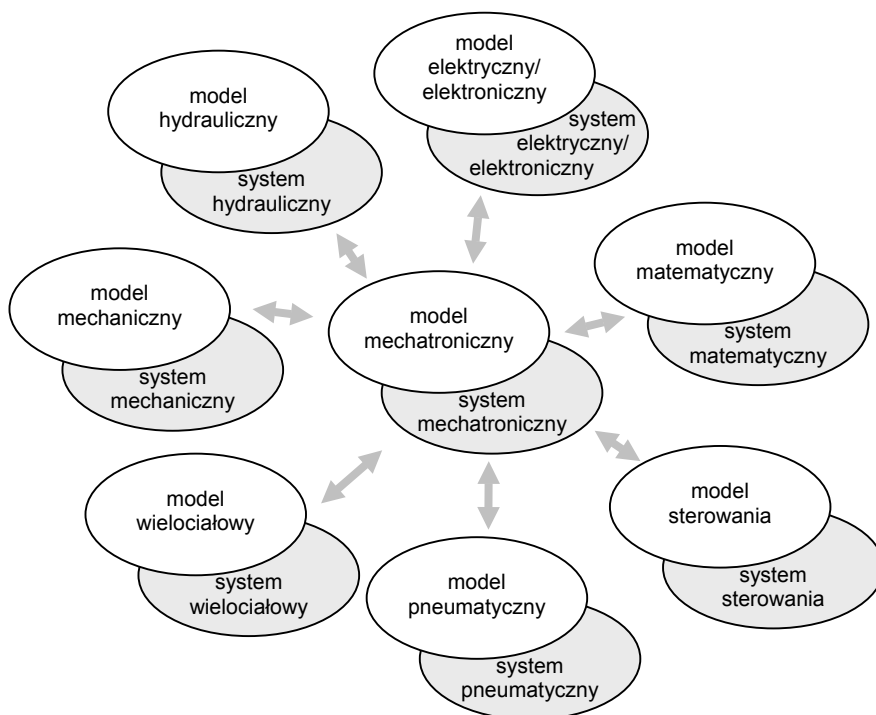
Rozwój produktów mechatronicznych jest procesem ogromnie kreatywnym. „Żywi” się on po części tym, że w model koncepcyjny wprowadza się parametry nowe, co automatycznie wymaga przepracowania danego modelu koncepcyjnego. Potwierdza to dotychczasowa praktyka rozwoju produktów mechatronicznych. Jeśli analizuje się udane warianty lub ogólne trendy rozwojowe w mechatronicznym rozwoju produktu, to jasno widać, że w pierwszej linii chodzi o to, aby w produkt integrować dodatkowe funkcje, albo usunąć niedoskonałości funkcji istniejących.

Narzędzia wspierające projektowanie mechatroniczne są różne i niejednorodne. Powody historyczne takiego rodzaju „niejednorodności” są prawie takie same jak dla techniki komputerowej: różni sprzedawcy sprzętu i oprogramowania, różne standardy wewnętrzne (specyficzne dla firmy) i powszechne, protekcja know-how i copyright itd. Taka sytuacja utrzymuje się i powinna istnieć, jeśli wymaga się aktywnego i konkurencyjnego wzrostu technologii informacyjnej. Z drugiej strony utrzymywanie różnych małych narzędzi, wspierających tylko jeden lub dwa pro-

blemy specjalistyczne, jest bardziej praktyczne również w aspekcie finansowym: użytkownik raczej preferuje wybór dokładnie tych narzędzi, jakich potrzebuje i łączy je razem zamiast kupować narzędzie monolityczne, w którym pewne funkcje w ogóle nie będą używane.

Najlepszym rozwiązaniem do poradzenia sobie z narzędziami niejednorodnymi jest integracja. Dla mechatronicznego środowiska projektowego można rozważyć trzy warstwy integracji: (1) integrację procesu, (2) integrację modelu i (3) techniczną integrację systemu. Integracja procesu koncentruje się głównie na tym jak skutecznie sterować etapami projektowania (procesami) w firmie, podczas gdy integracja modelu próbuje połączyć różne oprogramowanie (narzędzia) na wspólnym poziomie semantycznym. Kluczowym punktem technicznej integracji systemu jest zagwarantowanie wymiany informacji za pomocą szeregu usług serwisowych jak CORBA, JAVA czy OLE.

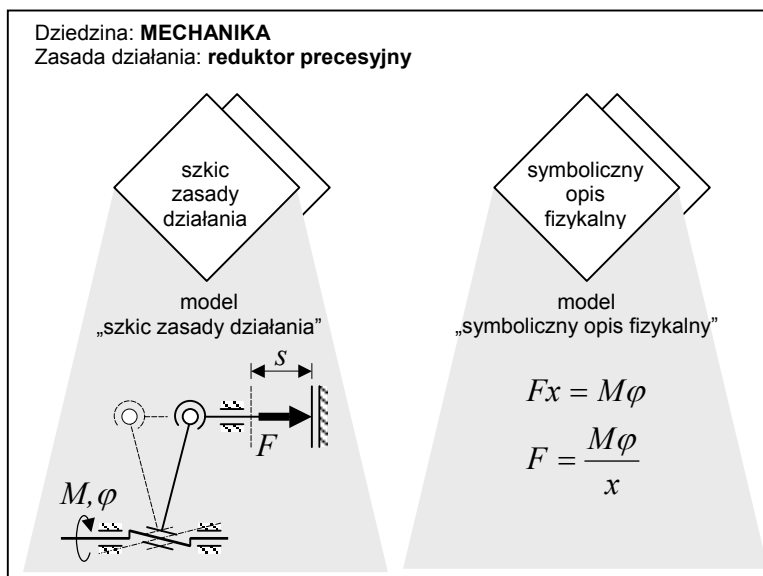
Wynikiem integracji na poziomie procesu jest formalny opis teorii projektowania mechatronicznego, w którym model procesu zawiera multidyscyplinarne etapy projektowe i multidyscyplinarne stadia rozwoju. Wyjściem jest model (rys. 66), który na poziomie semantycznym łączy razem modele specyficzne dla branży czy aplikacji [GRABOWSKI i inni 1998].



Rys. 66. Integracja modeli i systemów specjalistycznych

Innym podejściem do modelowania, z punktu widzenia modeli specjalistycznych, może być opisanie zachowania komponentów w czterech podstawowych domenach: mechanice, automatyce, oprogramowaniu i elektronice [KALLMEYER i GAUSEMEIER 1999]. Ponieważ aspekty modelowania w tych dyscyplinach są różne, w podstawowym rozwiązaniu systemu mechatronicznego specyfikuje się jego zachowanie za pomocą modeli znanych i stosowanych w danej dyscyplinie, przy czym zachowanie jednego komponentu opisuje się nie tylko jakimś jednym, jedynym modelem, lecz wieloma modelami wzajemnie się uzupełniającymi. Poniżej spróbuję ukazać istotę takiego opisu na przykładzie wprowadzonego w rozdziale 2 hamulca mechatronicznego.

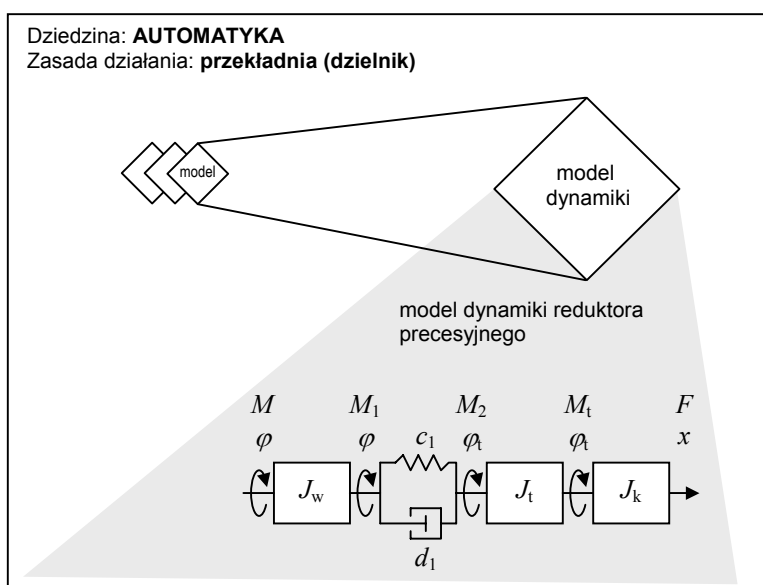
Mechanika. Rysunek 67 pokazuje przykład przekładni precesyjnej, której zachowanie opisane jest przez dwa uzupełniające się modele: „szkic podstawowy” i „symboliczny opis fizyczny”. „Szkic podstawowy”, przez pokazanie rodzaju ułożenia ciał stałych i ich możliwości ruchu, jasno pokazuje konstruktorowi zachowanie się (dla zasady funkcjonowania). Jako formy przedstawienia szkicu zasadniczego można wymienić szkice symboliczne, szkice kreskowe, szkice odręczne trójwymiarowe, zgrubne projekty bez skali jak również zmiany naniesione na istniejących rysunkach. Szkice zasadnicze dają się wytworzyć w sposób wspomagany komputerowo, za pomocą programów graficznych lub narzędzi CAD. „Opis symboliczno-fizyczny” do przedstawienia zachowania się jest matematycznym opisem zachowania efektów fizycznych, to znaczy modelowaniem współzależności matematycznych między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi, przy zastosowaniu symboli charakteryzujących wielkości fizyczne. Modelowanie to może być wspomagane komputerowo, przy użyciu odpowiednich narzędzi techniki informacyjnej w zastosowaniach matematyczno-technicznych.



Rys. 67. Model hamulca elektromechanicznego dla dziedziny „mechanika”

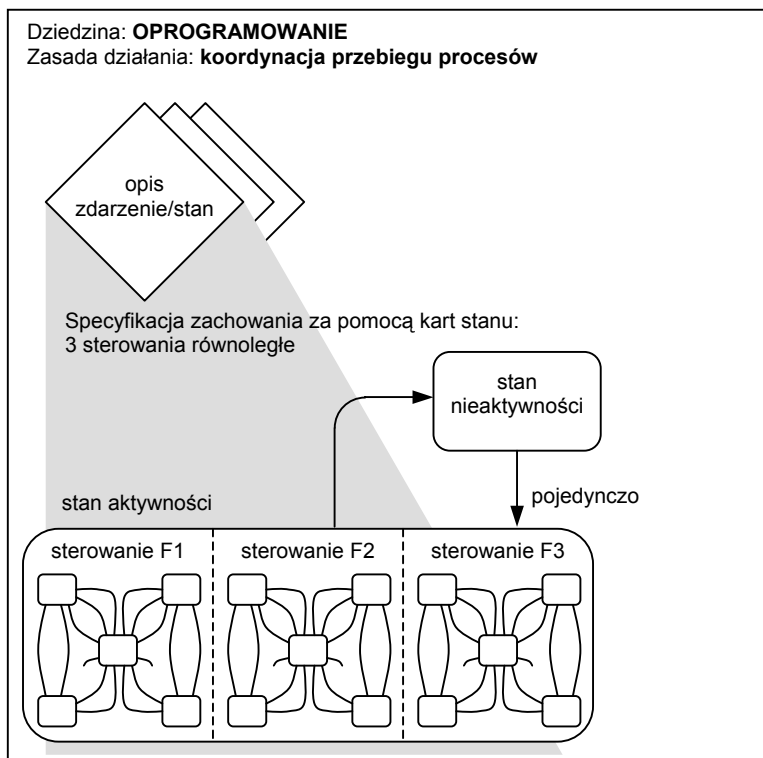
Automatyka. W automatyce (technice sterowania i regulacji) otrzymujemy dodatkowy opis zachowania się. Jego podstawą jest specyficzna metoda projektowania automatyki. Według niej należy określić strukturę systemu, w który trzeba ingerować. Odbywa się to przy uwzględnieniu komponentów sterowania i regulacji, aktoryki i sensoryki. Dalsze ustalenia komponentów kompensacji i komponentów sterowania są ustalane metodycznie dopiero w projekcie specyficznym dla dyscypliny, to znaczy po zbudowaniu rozwiązania podstawowego. Z drugiej strony, dla opracowania sterowania i regulacji należy ustalić modele kinematyczne i dynamiczne.

Model kinematyczny charakteryzuje możliwości ruchu ciał, bez uwzględniania przyczyn tego ruchu (siły i momenty). Kinematyczne modele zastępcze składają się ze szkiców lub modeli ruchomych ciał i charakterystyki możliwości ich ruchu. Tworzenie modeli może być wspomagane komputerowo programami graficznymi lub odpowiednimi narzędziami symulacji. W „dynamicznym modelu zastępczym” dynamiczne zachowanie się komponentów sprowadzane jest do dynamicznego zachowania się jednego zredukowanego, uproszczonego modelu. Ten uproszczony model składa się ze specyficznych dla danej dziedziny elementów (np. mas, oporów czy indukcyjności), które przyjmowane są jako idealne, oraz elementów, które są wprowadzane w celu uwzględnienia odchyłek od idealnego zachowania się (np. tarcia czy straty ciepła). Taki uproszczony model jakiegoś komponentu może być wspomagany komputerowo i przedstawiony za pomocą programów graficznych, przekształcony w równania matematyczne jako schemat blokowy lub w przypadkach szczególnych badany za pomocą specjalistycznych programów obliczeniowych. Rysunek 68 pokazuje dynamiczny model reduktora precesyjnego, zastosowanego w naszym hamulcu. Model ten jest obrazem reduktora z punktu widzenia techniki regulacji.



Rys. 68. Model hamulca elektromechanicznego dla dziedziny „automatyka”

Oprogramowanie. Oprogramowanie – abstrahując od implementacji algorytmów sterowania i regulacji – stosowane jest w systemach mechatronicznych po to, aby wywoływać reakcje zależne od zdarzeń zewnętrznych. W związku z tym mówi się również o oprogramowaniu do sterowania przebiegiem zachowań systemu mechatronicznego. Z jednej strony dla abstrakcyjnego opisu pożądanego przebiegu należy zdefiniować stany systemowe systemu mechatronicznego lub odwzorować je w technice oprogramowania (te stany systemowe są manipulowane z powodu występujących zdarzeń). Z drugiej strony należy ustalić, z jakim rodzajem danych należy pracować. Konieczne do tego modele nazywa się „opisem zdarzeniowo-stanowym” i „podstawową strukturą danych”.



Rys. 69. Model hamulca elektromechanicznego dla dziedziny „oprogramowanie”

„Opis zdarzeniowo-stanowy” specyfikuje stany i zdarzenia oraz związki między nimi. Wspecyfikowane stany są głównymi stanami systemowymi dla przetwarzania informacji w systemie mechatronicznym. Zdarzenia są, po pierwsze, takimi, które mogą być wywołane przez inne elementy systemu mechatronicznego, aby pobudzić (zapoczątkować) proces przejść stanowych (zdarzenia wejściowe); po drugie – są to zdarzenia wytwarzane przez komponent oprogramowania w celu przeprowadzenia zmian stanu w danym systemie mechatronicznym (zdarzenia wyjściowe). Z powodu związku między stanami i zdarzeniami ustala się, jakie zdarze-

nia wejściowe wywołują określone przejścia stanowe lub jakie zdarzenia wyjściowe wytwarzane są podczas przejść stanowych. Środkami opisu do modelowania zdarzeń i stanów są karty stanów (state charts) lub sieci PETRIego. Na rysunku 69 przedstawiony jest opis zdarzeniowo-stanowy na przykładzie koordynacji przebiegu dla aparatu ruchowego. Jako środki opisu zastosowano karty stanu.

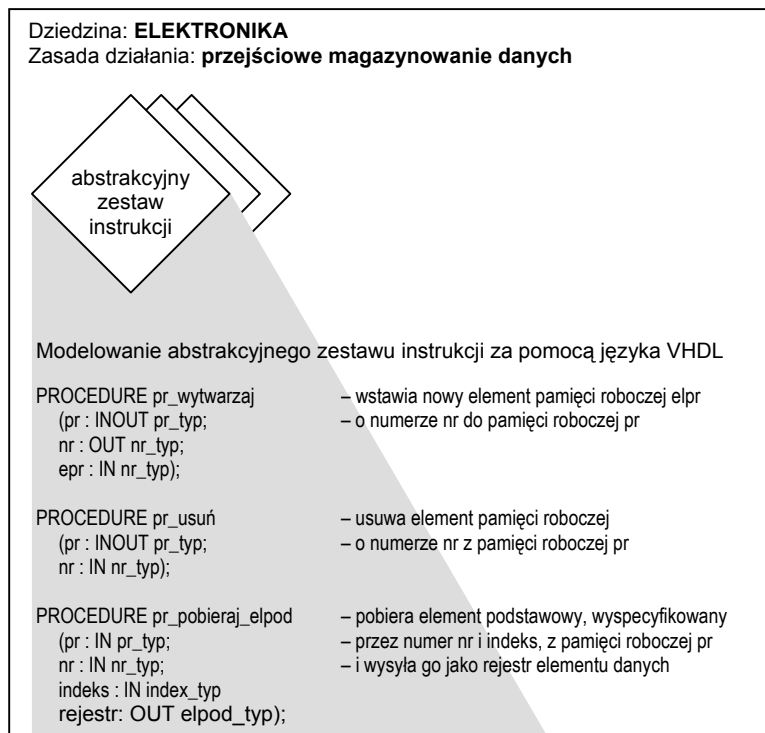
Przy zastosowaniu „podstawowej struktury danych” podobne zdarzenia dają się zestawić logicznie. Zdarzenia stają wtedy szczególnym wyrażeniem jakiegoś typu danych, przy czym struktura danych służy jakby generalizacji zdarzeń. Użycie fundamentalnej struktury danych oferuje dwie zalety. Z jednej strony generalizacja (zebranie lub uogólnienie zdarzeń) podnosi przejrzystość i zrozumiałość specyfikacji zachowania się, z drugiej – fundamentalna struktura danych określa, jakim danym mogą odpowiadać zdarzenia wejściowe. Ustalenie poszczególnych wyrażień typów danych określa interfejs do innych komponentów systemu. W zasadzie specyfikacja podstawowych struktur danych powinna następować abstrakcyjnie, to znaczy niezależnie od implementowania. W celu modelowania do dyspozycji mamy środki opisu niezależne od języków programowania, takie jak opracowana w związku z SDL (Specification and Description Language) notacja tekstowa.

Elektronika. Zasady działania dziedzin technika oprogramowania i elektronika są w systemach mechatronicznych wymiennie w ograniczonym zakresie. Oprogramowanie zaimplementowane na sprzęcie standardowym, z powodu łatwej zmienialności, ogólnie biorąc jest elastyczniejsze. „Stałookablowany” zaś sprzęt cyfrowy, przy pokonywaniu tych samych zadań, jest szybszy. Z powodu niewielkich kosztów w praktyce preferuje się oprogramowanie do sterowania przebiegami procesów. Specjalne komponenty sprzętowe opracowuje się dla wymagań szczególnych i spełniają one funkcje, które wykorzystywane są przez inne komponenty przetwarzające dane.

Ponieważ oprogramowanie i elektronika mogą wykonywać prawie takie same funkcje, zasady działania tych dziedzin w rozwiązaniu zasadniczym systemu mechatronicznego są modelowane podobnie. I tak zachowanie się zasady działania elektroniki również jest opisywane za pomocą uzupełniających modeli „opis zdarzeniowo-stanowy” i „podstawowa struktura danych”. Z drugiej strony elementy elektroniki często wykorzystuje się przez inne jednostki przetwarzania danych do wykonania zbioru poleceń specjalistycznych. W takiej sytuacji dochodzi do tego „abstrakcyjny zestaw instrukcji” – jako dalszy model uzupełniający specyfikację zachowania.

Abstrakcyjna instrukcja specyfikuje polecenie dla przetwarzania danych. Zbiór wszystkich instrukcji abstrakcyjnych, przygotowanych przez zasadę działania elektroniki, jest „abstrakcyjnym zestawem instrukcji”, który pozostaje do dyspozycji dla innych komponentów techniki informacyjnej podczas wykorzystywania wyspecyfikowanych komponentów sprzętowych do przetwarzania danych. Abstrakcyjne instrukcje specyfikują – w zależności od fundamentalnej struktury danych – oprócz tego typy danych wejściowych i wyjściowych każdorazowych poleceń. Możliwym środkiem opisu do modelowania abstrakcyjnego zestawu instrukcji jest VHDL

(VHSIC Hardware Description Language), którego zastosowanie zapewnia równocześnie przejście do fazy projektu specjalistycznego (rys. 70).



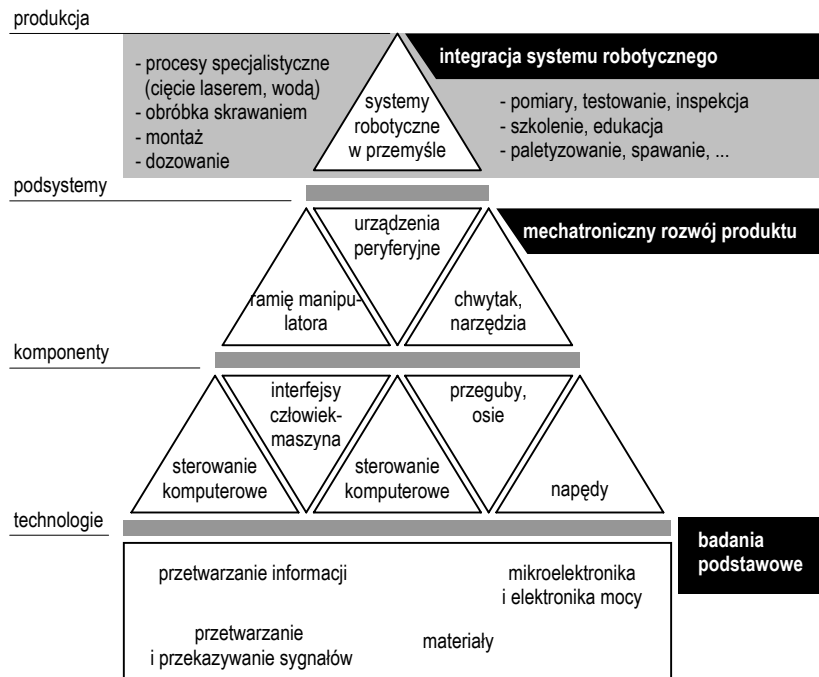
Rys. 70. Model hamulca elektromechanicznego dla dziedziny „elektronika”

Modele z techniki robotycznej

Planowanie i rozwój urządzenia mechatronicznego, podobnie jak każdego innego produktu, jest procesem etapowym, składającym się z kilku faz. Każda z nich ma typowe zadania, metody i narzędzia. Fazy te mogą przebiegać podobnie jak fazy rozwoju centralnego urządzenia mechatronicznego – robota.

Robotyka a mechatronika

Roboty traktuje się jako typowych przedstawicieli mechatroniki, integrujących aspekty manipulacji, sensoryki, sterowania i komunikacji. Rzadko spotyka się porównywalną różnorodność techniki i dyscyplin naukowych skoncentrowaną na funkcjonalności i osiągnięciach całego systemu jak w rozwoju i stosowaniu robotów. Robotyka integruje stan wiedzy wielu nowoczesnych technik, jak pokazuje rysunek 71 [WARNECKE i inni 1999].



Rys. 71. Robotyka a mechatronika

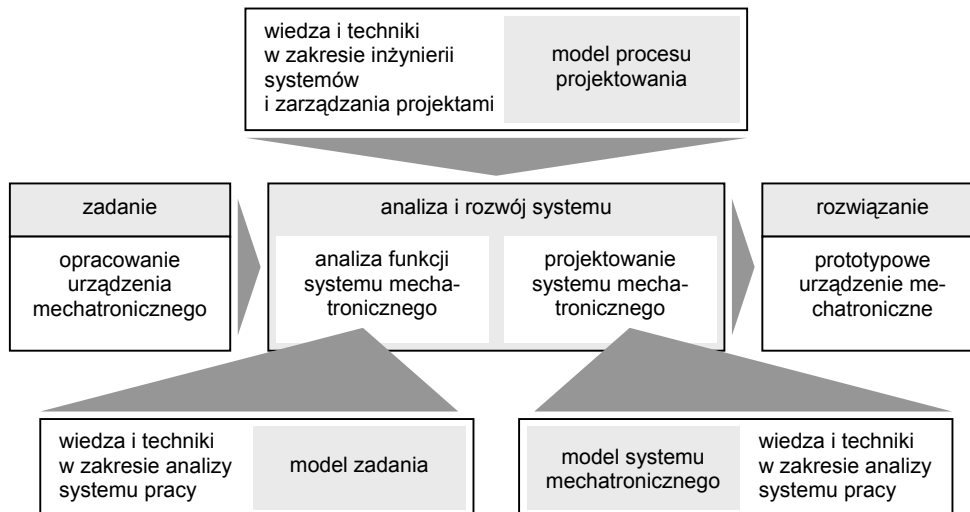
Planowanie produktu obejmuje wszystkie etapy od początkowego pomysłu produktu do wyspecyfikowania jego profilu. Chodzi tu o wszystkie informacje dotyczące głównych osiągnięć, przewidywanego kosztu produktu, liczby sztuk, kanałów dystrybucji, projektowanego czasu rozwoju i kosztów.

Następująca po tym *faza analizy i projektowania systemu* obejmuje specyfikację funkcji urządzenia, projektowanie koncepcyjne, konstruowanie sprzętu (hardware) i opracowanie oprogramowania oraz kompletną dokumentację wszystkich informacji ważnych dla wytwarzania, montażu, użytkowania i obsługi urządzenia mechatronicznego. Faza projektowania kończy się weryfikacją eksperymentalną prototypu urządzenia.

Faza przekonstruowania systemu obejmuje wszystkie działania prowadzące do poprawy systemu mechatronicznego na podstawie wykrytych niedociągnięć, potencjałów jakości, osiągnięć i kosztu, wymaganych modyfikacji i planowanych wariantów produktu.

Rysunek 72 ukazuje ogólny model fazy projektowania zgodnie z metodą inżynierii systemowej zaproponowanej przez DAENZERA i HUBERA [1994]. W *analizie systemów i opracowaniu projektu (konstrukcji)* stosuje się dwie metody i trzy modele. Wspierają one inżyniera zarówno podczas analizy funkcjonalnej jak i podczas projektowania konstrukcji urządzenia mechatronicznego. Modele te mogą mieć bardzo

różnych charakter, czego przykładem są modele procesu projektowania [ROHATYŃSKI 2003].

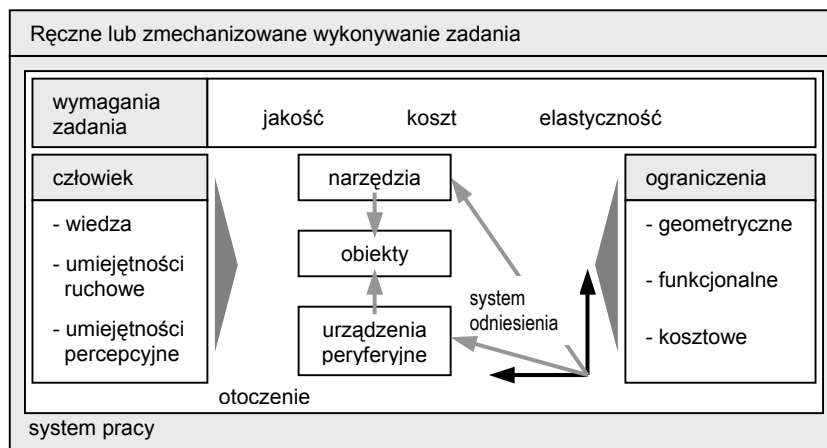


Rys. 72. Metody ogólnej inżynierii systemów dla rozwoju urządzenia mechatronicznego

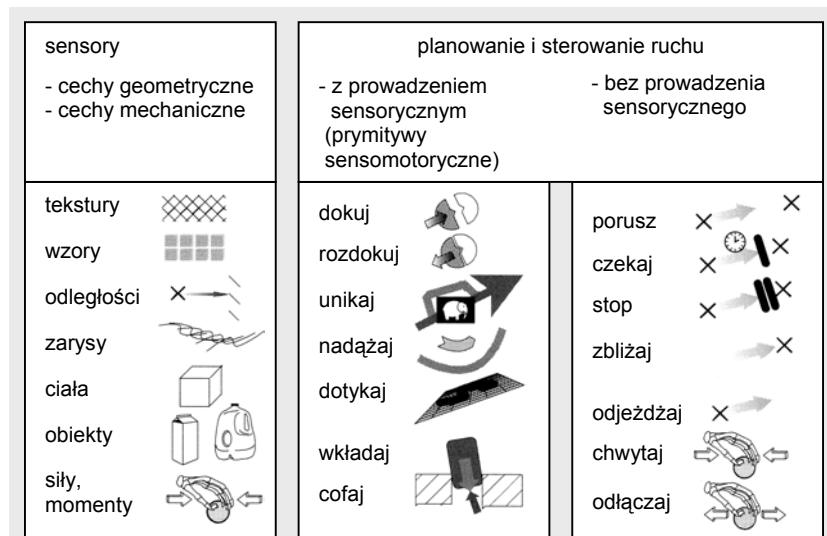
Analiza funkcjonalna „wyciąga” z zadania wszystkie te funkcje i wymagania (dotyczące osiągnięć), które będą zautomatyzowane i specyfikuje środowisko wykonywania zadania. Całe następujące po tym projektowanie i konstruowanie oraz konkurencyjność urządzenia mechatronicznego opierają się na analizie funkcjonalnej.

Analiza funkcjonalna

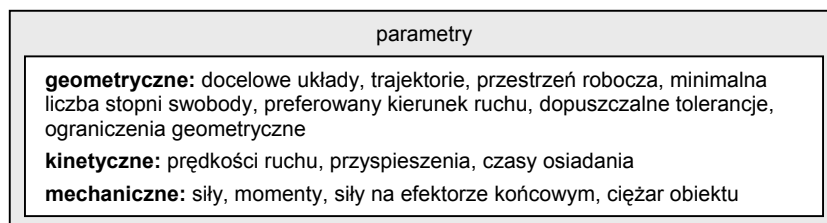
Mimo że wiele z wymagań ma charakter oczywisty, niektóre centralne parametry urządzenia mechatronicznego trzeba wydedukować z analizy systemów pracy. W celu określenia danych, dotyczących geometrycznych, kinematycznych i mechanicznych osiągnięć (parametrów) urządzenia mechatronicznego, należy wybrać, obserwować i opisać typowe systemy robocze, które mają być mechatronizowane. Analiza ta zwykle skupia się na cechach obiektów mechatronizowanych. Chodzi tu przede wszystkim o cechy, których słabość „objawia” się, gdy człowiek pracuje z tym obiektem (np. zbyt mała szybkość reakcji człowieka od chwili spostrzeżenia przeszkody do chwili naciśnięcia na pedał hamulca). W podejściu „top-down” dane zadanie rozbija się na elementy, jak w klasycznych metodach analizy pracy, takich jak pomiary czasu czy podział pracy na czynności czy ruchy elementarne. Istota funkcjonalnego opisu rozważanych zadań skupia się jednak na analizie geometrii, ruchów i sił wywieranych przez obiekt, narzędzie czy urządzenie peryferyjne oraz na możliwej zależności tej geometrii, tych ruchów i tych sił poddanych obserwacji i nadzorowi przez sensory. Ruchy obiektu lub narzędzia dzieli się na: (1) ruchy elementarne bez prowadzenia sensorycznego i sterowania oraz (2) elementy sensoryczne (sensoryczno-aktoryczne), zdefiniowane jako jednostka „postrzeganie-ruch”.



dekompozycja zadania



kwantyfikacja



Rys. 73. Model zadania dla funkcjonalnej analizy robotów [WARNECKE i in. 1999]

Kwantyfikacja tych elementów ruchu doprowadziła do definicji cech geometrycznych, kinematycznych i dynamicznych, które odgrywają centralną rolę podczas projektowania urządzeń mechatronicznych. Przykładem może być model rozkładu zadań na ruchy i elementy percepcyjne (sposrżezeniowe) dla robota (rys. 73).

Wynikiem analizy funkcjonalnej jest lista wymagań. Określa ona funkcjonalność urządzenia mechatronicznego i jego osiągi z punktu widzenia:

- ustalonych kryteriów, jakie musi spełniać;
- docelowych kryteriów, jakie powinno spełniać;
- życzeń (kryteria „dobrze by było mieć”).

Projektowanie podsystemów urządzenia mechatronicznego

Rozwiązania konstrukcyjne muszą być opracowane na podstawie funkcjonalnych specyfikacji urządzenia. Znajdowanie rozwiązań dla zadanych wymagań funkcjonalnych i osiągowych jest procesem zarówno intuicyjnym jak i systematycznym (PAHL, BEITZ 1984, 2002). Etapowy proces pomaga stopniowo zbliżyć się do rozwiązań optymalnych. Podział systemu mechatronicznego na podsystemy lub moduły wspomaga systematyczne i kompletne poszukiwanie zasad rozwiązań. Często używa się tak zwanych tablic morfologicznych czy macierzy eksploatacji [BRANOWSKI 1999], które wyszczególniają zasady rozwiązania dla każdego podsystemu lub modułu. Kompatybilne zasady rozwiązań można kombinować w rozwiązania systemowe i następnie je oceniać.

Proces konstruowania robota może być podzielony na trzy fazy (tab. 6) z rosnącym poziomem szczegółów:

1. W fazie koncepcyjnej robota stosuje się podejście „od góry na dół” (top-down) – stopniowy rozwój od zewnętrznej postaci konstrukcyjnej systemu (kinematyka) do jego struktury wewnętrznej (przekładnie).
2. W fazie projektowania i optymalizacji konstrukcji udoskonala się wybraną koncepcję.
3. W fazie projektowania szczegółowego (opracowywania konstrukcji) uszczegóławia się zoptymalizowaną konstrukcję w celu wyprodukowania wszystkich dokumentów dla wytwarzania, montażu, pracy i konserwacji robota.

Odpowiednie narzędzia do projektowania robota pomagają inżynierowi szybko znajdować racjonalne rozwiązania na różnych poziomach procesu projektowania i konstruowania. Dzięki temu łatwo można dokonywać zmian konstrukcyjnych i ich oceny; wykonywać złożone obliczenia dla kinematyki i kinetyki robota, analizy i optymalizacji dynamiki i struktury. Dla tych celów dostępne są liczne systemy oprogramowania, jak pokazuje tabela 7.

Tab. 6. Proces projektowania robota [WARNECKE i in. 1999]

I Koncepcja robota	
Etapy procesu	Wyniki
Wybór układu kinematycznego	układ kinematyczny
Ocena członów, parametry przegubów	model kinematyczny (parametry DH), drogi przegubów
Wybór rodzaju przekładni	konstrukcja układu napędzającego przeguby
Wybór komponentów przekładni	dane geometryczne, dane dotyczące osiągnięć, interfejsy wybranych komponentów
II Postać konstrukcyjna i optymalizacja	
Etapy procesu	Kryteria optymalizacji
Optymalizacja członów robota i parametrów przegubów (parametry DH)	minimum liczby stopni swobody, zręczność kinematyczna, wielkości podstawy maksymalna przestrzeń robocza
Optymalizacja osiągnięć kinetycznych	minimum czasów ruchu minimum przyspieszenia przegubów
Wybór silników, przekładni, łożysk, sprzęgieł	maksimum momentów obrotowych minimum pików momentu (jednolite profile momentu obrotowego) maksimum rozpraszania ciepła
Okablowanie	minimum testów i zginania, zajmowania przestrzeni
Wybór materiałów	minimum ciężaru, obróbki skrawaniem, korozji maksimum sztywności
Wymiarowanie osi, obudowy, podstawy, kołnierza narzędziowego	minimum obróbki skrawaniem, ciężaru, liczby części, montażu
III Szczegółowe projektowanie konstrukcji robota	
Etapy procesu	Wyniki
Projektowanie części	rysunki części
Montaż systemu robotycznego	zestawienie materiałów, instrukcje montażu, kalibracji
Projektowanie elektryczne, elektroniczne	układy obwodów elektrycznych, zestawienia materiałów
Dokumentacja	podręcznik pracy, instrukcje obsługi

Tab. 7. Kategorie narzędzi do projektowania robota

Kategoria narzędzia	Cel
Symboliczne rozwiązywanie równań	Generowanie matematycznych modeli robota, analiza, optymalizacja parametrów kinematycznych, kinetycznych i dynamicznych
Pakiety do symulacji układów wielociałowych	Modelowanie, analiza i synteza dynamicznych układów wielociałowych
Pakiety metody elementów skończonych (MES)	Analiza strukturalna, modalna i drganiowa ciał i układów wielociałowych
Pakiety komputerowo wspomaganego projektowania (CAD)	Odzworowywanie, wymiarowanie, dokumentacja części, konstrukcji i systemów
Pakiety komputerowo wspomaganiej inżynierii (CAE)	Różnorodne narzędzia pokrywające wszystkie etapy procesu rozwoju produktu od specyfikacji produktu do jego wytwarzania

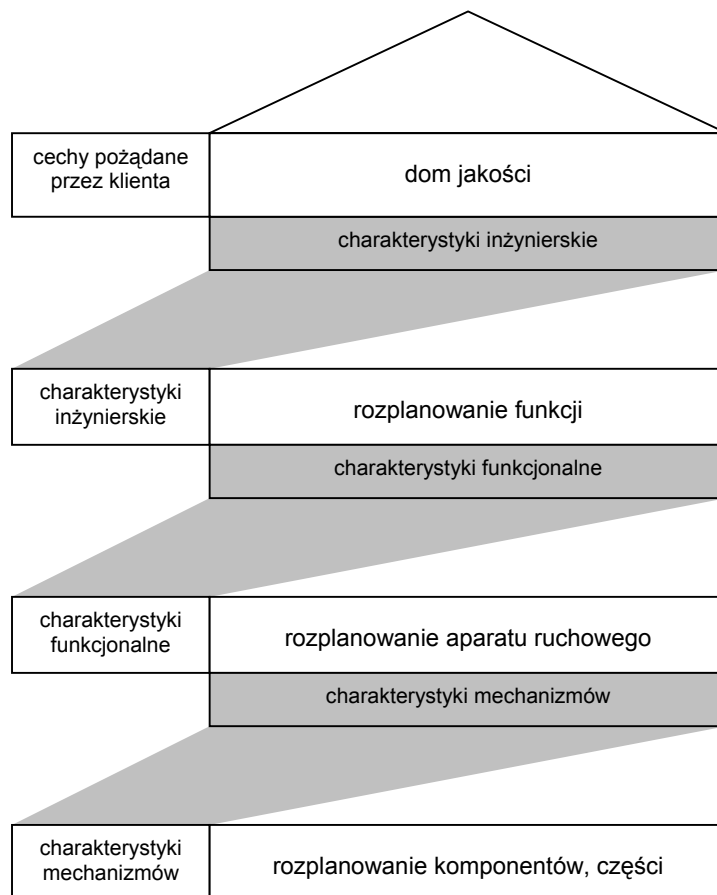
W konstruowaniu kinematyki i napędu robota szeroko stosuje się specjalistyczne narzędzia komputerowo wspomaganiej inżynierii (CAE). Służą one do symulacji konstrukcji, optymalizacji i programowania off-line. Narzędzia te wykazują zarówno cechy komputerowo wspomaganego projektowania (CAD) jak i symulacji układów wielociałowych.

Ocena konstrukcji i kontrola jakości

Wytwórcy o klasie światowej są w stanie lepiej od innych konkurentów dopasować swe produkty i usługi do wymagań i potrzeb klienta. Osiągnięcie tego celu wymaga ciągłej współpracy między klientem a wytwórcą, projektantem a dostawcą. Odpowiednią metodą do zarządzania wejściami funkcji i jakości przez cały proces rozwoju jest rozwinięcie funkcji jakości (Quality Function Deployment, QFD, rys. 74).

„Dom jakości” (House of Quality) jest narzędziem, które zapisuje i przekazuje informację o produkcie do wszystkich grup zaangażowanych w proces projektu robota. „Dom jakości” zawiera wszystkie istotne wymagania dla oceny projektu. Pierwszym zadaniem do wykonania w dowolnym przedsięwzięciu QFD jest wyjaśnienie różnych współzależności w procesie projektowym, które inaczej pozostałyby ukryte lub niebrane pod uwagę. Mamy tu na myśli:

- systematyczne wyszczególnienie i ocenę wymagań,
- identyfikację funkcji krytycznych i wymagań dotyczących osiągnięć,
- wymagania jakościowo-kosztowe
- ocenę krytycznych części i procesów produkcyjnych.



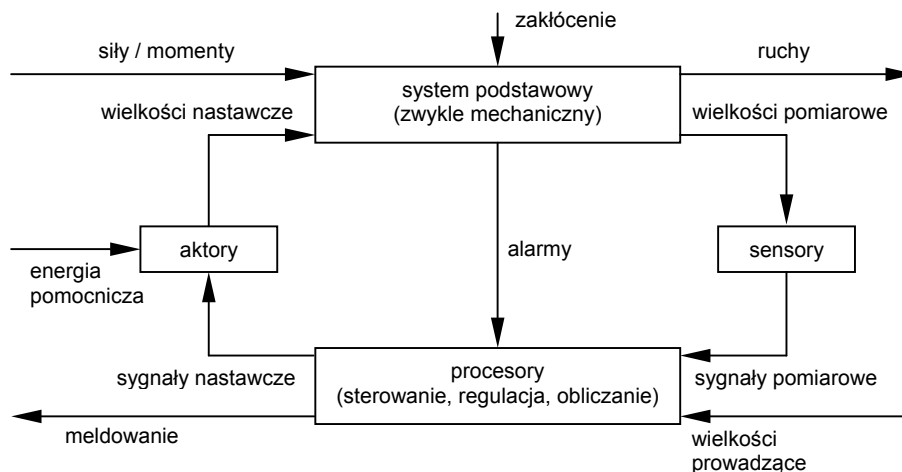
Rys. 74. Rozwinięcie wymagań dotyczących funkcji osiągow (parametrów) w procesie projektowania urządzenia mechatronicznego

Projektowanie mechatroniczne jako problem syntezy

Z punktu widzenia mechaniki klasycznej bada się, jakie ruchy wykonuje ciało, gdy działa na nie siła, a jego ruch ograniczony jest przez warunki przymusowe (więzy). Tak postawione pytanie prowadzi do problemu analizy.

W projektowaniu mechatronicznym chodzi o odwrotne postawienie zagadnienia. Jakie siły i momenty trzeba wywierać na ciało, aby wykonywało ono określony ruch? Pożądany ruch powinien być przy tym realizowany także przy występujących zakłóceniach. Przez odwrócenie pytania otrzymujemy *problem syntezy*. Jego rozwiązanie techniczne zakłada, ogólnie biorąc, istnienie członów regulacyjnych i nastawczych. Oznacza to, że, oprócz mechaniki, należy sięgnąć do dalszych dyscyplin, na przykład opracowania sensorów i integracji sensorów, techniki regulacji,

aktoryki i przetwarzania informacji. Rysunek 75 pokazuje ogólny schemat mechatroniki jako problemu syntezy [HEIMANN, GERTH, POPP 2001].



Rys. 75. Mechatronika jako problem syntezy

Głównymi wielkościami pomiarowymi w systemach mechatronicznych są wielkości:

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

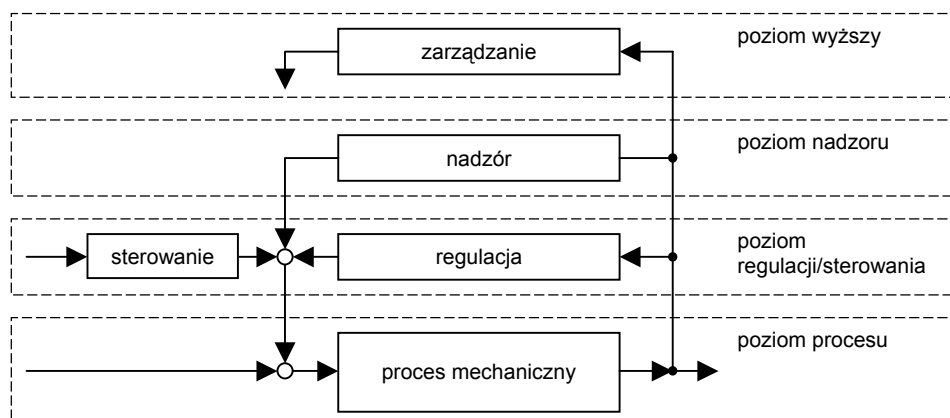
Duże znaczenie dla zastosowania koniecznych do tego systemów pomiarowych ma ich zdolność integrowania się z procesem. Zdolność ta zależy istotnie od ich dynamiki, rozdzielczości, krępkości (odporności na zakłócenia), trwałości, miniaturyzacji, jak również od tego, czy nadają się do cyfrowej obróbki sygnału.

Za pomocą aktorów sygnały nastawcze, wytworzone za pomocą obróbki informacji, przetwarzane są w wielkości nastawcze. Działanie tych członów nastawczych oparte jest na wzmacnianiu energii. Dlatego konieczna jest energia pomocnicza. Może być to energia elektryczna czy płynowa (hydrauliczna, pneumatyczna). Nowoczesne człony nastawcze mają obwody regulacji położeniowej, które często pracują w sposób cyfrowy i oparty na modelu. Dlatego możliwe są wysokie dokładności pozycjonowania przy jednocześnie dobrej dynamice nastawiania.

Istotną cechą systemów mechatronicznych polega na tym, że ich właściwości w dużej mierze określone są przez elementy niematerialne, to znaczy przez oprogramowanie. Przetwarzanie danych procesowych odbywa się za pomocą odpowiednich mikrokontrolerów (mikrosterowniki), 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 przerwami itd. Przetwarzanie danych procesowych odbywa się na wielu poziomach i przejmuje – w zależności od stopnia zadania –

różne zadania regulacji, nadzoru i optymalizacji. Na przykład trzy poziomy, przedstawione na rysunku 76, przejmują następujące zadania:

- *Poziom 1*: sterowanie, regulacja, sprowadzenie do poziomu procesu,
- *Poziom 2*: meldowanie alarmu (kontrola wartości granicznej), nadzór i diagnoza uszkodzeń, wyprowadzenie prostych przedsięwzięć dla dalszego operowania lub zatrzymanie,
- *Poziom 3*: koordynacja systemów częściowych, optymalizacja, ogólne zarządzanie (management) procesem.



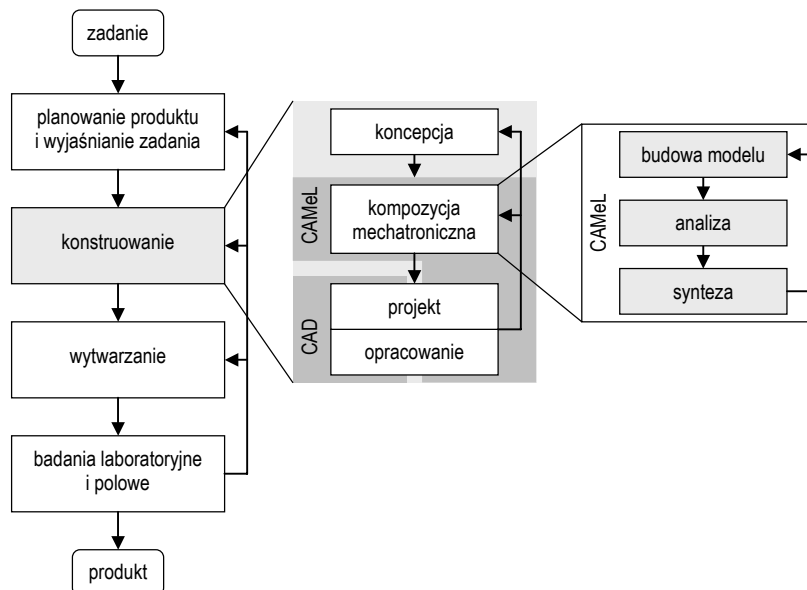
Rys. 76. Poziomy przetwarzania danych procesowych według Isermanna [1999]

Poziomy dolne z reguły reagują szybko i działają lokalnie, a poziomy górne reagują powoli i przejmują zadania globalne.

Przetwarzanie sygnału i przetwarzanie danych procesowych dotyczy zwykle poziomów 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.

Dynamiczne zachowanie systemu mechatronicznego wynika ze sprzężenia jego podsystemów. Jeżeli do projektowania takiego systemu podchodzi się w sposób tradycyjny, sekwencyjny, to zachowanie się systemu jako całości, a także to czy koncepcja rozwiązania w ogóle jest użyteczna, daje się stwierdzić dopiero w późnej fazie projektowania. Wtedy jednak niewielkie zmiany konstrukcyjne powodują duże koszty. Wyjściem z tego dylematu jest projektowanie scharakteryzowane przez pojęcie kompozycji mechatronicznej [TOEPPER i inni 2002].

W takim projektowaniu, po opracowaniu koncepcji, następuje kompozycja mechatroniczna (rys. 77). Charakterystyczne cechy konstrukcyjne traktuje się na początku mniej szczegółowo, w to miejsce zaś obok struktury nośnej rozważa się całościowo aktry, sensory i przetwarzanie informacji.



Rys. 77. Kompozycja mechatroniczna od zadania do produktu [TOEPPER i inni 2002]

Kompozycja mechatroniczna jest procesem iteracyjnym, składającym się z budowania modelu, analizy i syntezy. Najpierw cały system odwzorowuje się w komputerze. Stopniowo modeluje i analizuje się poszczególne grupy funkcji. Zaczyna się od modelu prostego, który się rozszerza i uprecyzynia, aż wszystkie zespoły zostaną wzajemnie zgrane i zaprojektowane jest przetwarzanie informacji. Dopiero gdy skończona zostanie kompozycja mechatroniczna i spełnione zostaną wymagania dotyczące dynamiki i dokładności, zaczyna się projekt konstrukcyjny – kształtowanie postaci konstrukcyjnej.

Projektowanie elektroniczne w środowisku mechatronicznym

Siłą napędową projektowania mechatronicznego jest możliwość przekazania złożoności z mechaniki do elektroniki i oprogramowania. Siłę tę wspiera ciągły wzrost wydajności i spadek kosztów komponentów elektronicznych i mikroprocesorów. W przypadku elektroniki siłą napędzającą rozwój narzędzi projektowania jest potrzeba poradzenia sobie z rosnącą złożonością elektroniki, a szczególnie potrzeba wspierania produkcji złożonych obwodów na chipie.

Wzrost złożoności pojedynczych chipów powoduje trudności nie tyle natury technicznej (elektronicznej), ile raczej kognitywistycznej (poznawczej); konstruktorzy po

prostu zaczynają tracić zdolność do zrozumienia złożoności i aplikacji struktur chipowych [WALTERS, BRADLEY, DOREY 1998]. Z punktu widzenia projektowania obwód zawierający niewiele, a nawet dziesiątki, komponentów może być przedstawiony na jednym kawałku papieru i zachowany w umyśle konstruktora. Gdy liczba komponentów w obwodzie rośnie, to odpowiednio maleje zdolność konstruktora do rozumienia szczegółów całej struktury. W istocie systemy, które same są zespołami tysięcy czy milionów komponentów na jednym chipie, same stają się komponentami większych konstrukcji.

Wprowadzenie narzędzi komputerowych i symulacji pozwala zachować (zapamiętać) cały układ. Pozwala to konstruktorowi koncentrować się na szczegółowej części czy obszarze całości projektu. Komputer jest więc w stanie zapewnić, że specjalistyczne reguły projektowania są zachowane przez całe projektowanie, niezależnie od jego skali. Kombinacja reguł sterujących układem i połączeniami na modułach chipowych, razem z dostępnymi technikami symulacji, dostarczyła przemysłowi półprzewodnikowemu środków utrzymujących jego wzrost. Skutkiem są coraz bardziej złożone zespoły komponentów na chipie. Twierdzi się, że przemysł półprzewodnikowy jest daleki od bycia dojrzałym w ciągłym stanie szybkiej ewolucji! Następuje bowiem bardzo szybkie zastępowanie systemów istniejących nowymi konstrukcjami, jak to każdy może łatwo dostrzec w technice komputerowej.

Do wspierania tego rozwoju złożoności elektroniki opracowano narzędzia jak Hardware Description Languages (HDLs). Pozwalają one opisać obwód elektroniczny w postaci linijek kodu. Jeden z tych języków, VHDL, został przyjęty jako standard w 1987 roku i zaktualizowany w 1993 roku. W 1995 roku dodano możliwość projektowania obwodów analogowych. Dostępność i użytkowanie języków opisu, jak VDHL, jako alternatywy dla klasycznych schematów jest jednak często kwestionowana.

Języki HDLs dają się łatwo przenosić z jednego środowiska do drugiego, są portabilne. Pomaga to przekazywać projekty między projektantem systemu a wytwórcą. Złożoność elektroniki i tempo jej zmian powodują, że prawie każdy projekt nowego układu elektronicznego traktowany jest często tak, jakby nic podobnego nie było przed nim. To swego rodzaju zjawisko „grubej kreski” ma miejsce mimo zdecydowanej modularności i możliwości dopasowania modułów w późniejszych konstrukcjach. Takie podejście różni się znacznie od ewolucyjnego podejścia w wielu projektach układów mechanicznych.

Ewolucja elektronicznych metod projektowania a mechatronika

Aż do początku XX wieku projektowanie inżynierskie dotyczyło głównie systemów mechanicznych i budowlanych. Kładło ono nacisk na zależności przestrzenne, ruchy, przyłożenie i przekazywanie sił. Inżynieria elektryczna i elektronika (szczególnie od połowy XX wieku) ewoluowały długo dość oddzielną ścieżką, ukierunkowane na manipulowanie prądami i napięciami. „Spotkanie” mechaniki z elektryką i elektroniką nastąpiło na gruncie różnych systemów elektromechanicznych, głównie przekaźników do sterowania sekwencją operacji mechanicznych.

Wynalezienie tranzystora w 1948 roku i następujący po tym wzrost przemysłu elektronicznego doprowadził w latach sześćdziesiątych do rozwoju konstrukcji mikro-

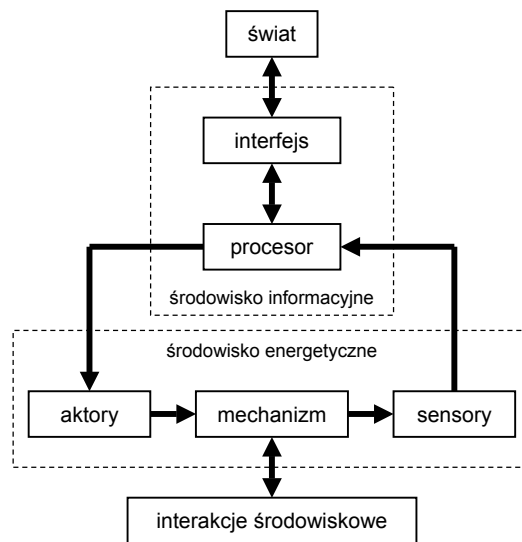
komputerów sterowniczych. Komputery te miały jednak ograniczony zakres i możliwości. Dopiero nadejście technologii VLSI i pierwszych 8-bitowych mikroprocesorów w 1972 roku spowodowało, że tania technika komputerowa zaczęła mieć wpływ na projektowanie i działanie szerokiego zakresu produktów i procesów.

W latach 1972-1997 nastąpił 10 000-krotny spadek rzeczywistego kosztu mocy obliczeniowej. Efektem był ogromny wzrost rozmieszczenia podsystemów elektronicznych w szerokim zakresie produktów i systemów. Wynikiem tego rozwoju, jak sugeruje rysunek 78, było właśnie pojęcie mechatroniki [WALTERS, BRADLEY, DOREY 1998]. Ewolowało ono jako zintegrowane i integrujące podejście do projektowania złożonych produktów i systemów, w których drogie rozwiązania mechaniczne zastępuje się tańszymi, opartymi na uproszczonych mechanizmach, elektronice i oprogramowaniu.

Jednak w tym samym trudno dostrzec podobne zbliżenie w zakresie wspólnej mechatronicznej płaszczyzny projektowej. Zamiast tego elektronika, informatyka i mechanika koncentrowały się na rozwoju narzędzi wspomagających projektowanie z punktu widzenia ich specjalistycznych potrzeb. Niektóre koncepcje menedżerskie i organizacyjne, takie jak inżynieria współbieżna, które usiłowały po części kierunkować się na problem uzyskania integracji, prowadziły często do rosnącej rozbieżności metod i narzędzi.

Pośród pierwotnych wyborów, jakie napotyka elektronik, jest forma w jakiej obwód ma być implementowany. Na przykład dla aplikacji specjalistycznej wybór może być między mikroprocesorem lub mikrokontrolerem, chipem z procesorem sygnałowym (DSP), wyspecjalizowanym obwodem scalonym (ASIC), programowalną matrycą bramek (FPGA) czy programowalnym urządzeniem logicznym (PLD). Każde z nich jest wspomagane przez własny zestaw narzędzi projektowych, często dopasowanych do specjalistycznego urządzenia lub rodziny urządzeń w przypadku FPGAs, PLDs i mikroprocesorów/mikrokontrolerów czy w kierunku procesorów wytwarzanych specjalistycznie w przypadku ASICs. Inne obszary wpływające na wybór – jak środowisko pracy, wielkość produkcji, możliwości testowania i wspomaganie, łatwość przyszłej modyfikacji i rozwój systemu – uwzględnia się z punktu widzenia tego, co jest znane i wygodne. I tak: podczas gdy wielkość produkcji może podsuwać rozwiązanie oparte na ASIC, potrzeba przyszłych modyfikacji może podsuwać rozwiązanie zorientowane na oprogramowanie, oparte na mikroprocesorze czy chipie DSP. Czasem wymagane jest rozwiązanie z sygnałem mieszanym (analogowo/cyfrowym), a nie system czysto analogowy czy czysto cyfrowy.

Pod naciskiem terminów konstruktor może skłaniać się ku rozwiązaniom dostępnym na rynku. Podejście takie może być owocne w wielu przypadkach, często może jednak znacznie ograniczyć zdolność projektanta do działania innowacyjnego i do wprowadzenia rozwiązań nowych. Niewłaściwy wybór rozwiązania elektronicznego może często doprowadzić do pogrzebienia możliwości dalszej modyfikacji i uproszczenia elementów mechanicznych konstrukcji całego urządzenia mechatronicznego.



Rys. 78. System mechatroniczny według [WALTERS, BRADLEY, DOREY 1998]

Strategia projektowania elektronicznego jest różna. Jest to często mieszanka podejścia top-down, bottom-up i nawet middle-out, zależnie od oswajania się z problemem i doświadczenia w przeszłości. W ten sposób doświadczony konstruktor elektronik może działać w celu zmodularyzowania konstrukcji, izolując te cechy systemu, które mają znaczenie z punktu widzenia wyspecyfikowanych parametrów. Podczas takiego podejścia często skutecznym jest długie doświadczenie w dziedzinie specjalistycznej. Należy jednak mieć na uwadze, że niekiedy doświadczenie to może prowadzić tylko do konstrukcji, które w istocie będą niewielkimi modyfikacjami konstrukcji już istniejących.

Podsumowanie 1: Etapy projektowania urządzeń mechatronicznych

Istotę i metodę projektowania mechatronicznego w bardzo przystępny sposób przedstawia ISERMANN [1999]. Robi to w nawiązaniu do projektowania urządzenia klasycznego (tab. 8).

Tab. 8. Etapy projektowania mechatronicznego z przykładami. *Kursywa* oznacza etapy typowe dla systemów mechatronicznych.

Kolejne etapy	Treść etapu, przykłady
1. Pierwsza podstawowa konstrukcja procesu	mechanika, elektryka, termodynamika
2. <i>Pierwszy podział na funkcje podstawowe</i>	<i>przetwarzanie procesowe, przetwarzanie informacji</i>
3. <i>Sensoryka, aktoryka, energia pomocnicza</i>	<i>zasady, integracja konstrukcyjna, zdecentralizowana obróbka sygnału (komponenty „inteligentne”)</i>
4. Podstawowe funkcje przetwarzania informacji	sterowanie, regulacja, nadzór, koordynacja, optymalizacja
5. Obsługa, interfejsy człowiek-maszyna	postać konwencjonalna, nowe możliwości
6. <i>Architektura sprzętu komputerowego</i>	<i>mikroprocesory (standardowe, specjalne), struktura podstawowa (centralna, zdecentralizowana), magistrała systemowa</i>
7. Oprogramowanie	<i>zadania, wymagania, koncepcja rozwiązania, struktura oprogramowania, implementacja (kodowanie), walidacja, język (zależny od procesora), zdolność do pracy w czasie rzeczywistym</i>
8. <i>Funkcjonalna integracja procesu i elektroniki przez przetwarzanie informacji</i>	<i>dopasowanie funkcji podstawowych, tłumienie elektroniczne, linearyzacja przez algorytmy, wpływ na wielkości niemierzalne, duże zakresy pracy przez algorytmy adaptacyjne, właściwości uczące, diagnoza uszkodzeń</i>
9. <i>Uproszczenie konstrukcji podstawowej</i>	<i>Kinematyka, napędy zdecentralizowane, bez linearyzacji, bez pamięci pośredniej</i>
10. <i>Podniesienie niezawodności i bezpieczeństwa</i>	<i>Wczesne rozpoznawanie uszkodzeń, redundancja, fail-safe, rekonfiguracja</i>
11. <i>Zastosowanie szczególnych narzędzi projektowania</i>	<i>Modelowanie, identyfikacja, symulacja (również hardware-in-the loop), optymalizacja (CAD) funkcji</i>
12. <i>Weryfikacja eksperymentalna</i>	<i>Komponenty, cały system</i>

Etapy te można opisać następująco:

Pierwsza podstawowa konstrukcja procesu i podział na funkcje podstawowe

Pierwsza podstawowa konstrukcja procesu, jaki ma być realizowany w projektowanym systemie mechatronicznym, wychodzi zwykle ze znanych rozwiązań podprocesu mechanicznego i związanych z nim podprocesów elektrycznych, termodynamicznych czy chemicznych. Z tym wiąże się również pierwszy podział funkcji podstawowych między przetwarzanie procesowe i przetwarzanie informacji. Oznacza

cza to, że należy rozważyć w „sensie mechatronicznym”, jakie funkcje – poza głównym strumieniem energii lub poza przenoszeniem siły – można zrealizować prościej, lepiej lub taniej na drodze cyfrowo-elektronicznej.

Wybór sensoryki, aktoryki i energii pomocniczej

Istotną rolę podczas podziału na funkcje podstawowe odgrywają zastosowane sensory (a przez to technika pomiarowa) i aktory oraz przynależna energia pomocnicza, jako interfejsy między procesem i elektroniką.

Bada się przy tym czy przez uzupełnienie wielkości pomiarowych i nastawczych można dodatkowo wpływać na proces w celu, na przykład, zwiększenia wydajności czy niezawodności, rozszerzenia zakresu pracy czy realizacji nowych funkcji. Uzupełnienie procesu większą liczbą sensorów czy aktorów zwiększa liczbę stopni swobody a przez to elastyczność i zdolność dopasowywania się pierwotnej konstrukcji podstawowej.

Wybierając sensory dla mierzonych wielkości elektrycznych (np. napięcie, prąd, natężenie pola) i wielkości mechanicznych (np. droga, prędkość, przyspieszenie, siła moment obrotowy, ciśnienie) oraz termicznych (np. temperatura), rozpatruje się rzecz z wielu punktów widzenia. W tym kontekście szczególne znaczenie w systemach mechatronicznych mają takie cechy, jak: integracja z procesem, dynamika, rozdzielczość, krzepkość mechaniczna i termiczna, niewielkie zużycie, bezdotykowość, miniaturyzacja i łatwe przejście do cyfrowej obróbki sygnału. Coraz bardziej interesująca staje się również integracja funkcji sensorycznych i obróbki sygnału w jednym wspólnym nośniku sygnału. Może to zwiększyć niezawodność, umożliwić bezpośrednie przejście do sygnałów cyfrowych lub magistral systemowych oraz pomóc przeprowadzić (zdecentralizowaną) obróbkę sygnału, np. filtrowanie, linearyzację, korekcję wielkości zakłócających („inteligentne” komponenty sensora).

Wytworzone z obróbki informacji wielkości nastawcze mają niewielką energię. Są one przetwarzane przez aktory w strumieniu materii procesowej lub strumieniu energii procesowej o wysokim poziomie energii. Istotnymi elementami konstrukcyjnymi są: napęd nastawczy i człon nastawczy. Moc, wymagana do nastawienia, pobierana jest w postaci mocy pomocniczej – elektrycznej, pneumatycznej lub hydraulicznej. Ważna jest tu konstrukcyjna integracja aktorów z procesem.

Według zasady działania aktory można podzielić na trzy grupy: elektromechaniczne, płynowe i niekonwencjonalne. Ich obszary zastosowania wynikają z wielu właściwości, np. z rodzaju energii pomocniczej, liniowości lub nieliniowości charakterystyk, dynamiki, translacyjnej lub rotacyjnej wielkości wyjściowej, proporcjonalnej lub całkowitej charakterystyki, siły nastawiania, drogi nastawiania, szybkości nastawiania, stosunku mocy do ciężaru. Ponieważ same aktory są systemami mechatronicznymi, przedstawiane tu ogólne etapy projektowania dotyczą również ich samych.

Przez opartą na modelu obróbkę informacji można skompensować niektóre negatywne cechy w postaci regulacji cyfrowej nieliniowej i implementować wczesne

rozpoznawanie uszkodzeń. Również w aktorach widać rozwój w kierunku komponentów zdecentralizowanych, „inteligentnych”.

Ustalenie podstawowych funkcji obróbki informacji

Na podstawie wybranych wielkości mierzonych i nastawianych można ustalić podstawowe funkcje obróbki informacji. Na najniższym poziomie jest to sterowanie i regulacja, na średnim – nadzór z wczesnym rozpoznawaniem błędów i ewentualnie diagnozą błędów, a na wyższych poziomach – ogólne zarządzanie procesem z np. zadaniami koordynacji, optymalizacji różnych stanów pracy (start, praca, stop) itd. Do projektu tych funkcji i do parametryzacji algorytmów potrzebna jest obszerna wiedza o procesie. Istotne stają się tu te statyczne i dynamiczne charakterystyki procesu, na które można wpływać konstrukcyjnie. Przez korzystne konstrukcyjne ukształtowanie procesu można silnie wpływać na osiągalną jakość sterowań, regulacji, optymalizacji itd. Czyni się to najlepiej przez teoretyczne modelowanie komponentów. Obróbka informacji w systemach mechatronicznych jest bardzo różnorodna.

Ustalenie interfejsu człowiek-maszyna

Powstaje również wiele nowych możliwości dla sposobu obsługi i ukształtowania interfejsu między człowiekiem i maszyną. Dotyczy to np. przedstawienia informacji w postaci właściwie ukształtowanych wyświetlaczy lub ekranów oraz elektronicznie dopasowanych elementów obsługowych, takich jak np. koła kierownicze, dźwigi czy pedały.

Wybór architektury sprzętu komputerowego

Architektura sprzętu komputerowego charakteryzuje się wieloma możliwościami wynikającymi z rozwoju mikroelektroniki. W przypadku mniejszych systemów mechatronicznych wchodzi w grę głównie procesory standardowe lub specjalizowane układy przełączające. W realizacjach ze sprzętem standardowym preferuje się mikroprocesory, bo są uniwersalne i elastyczne w stosowaniu. W połączeniu z takimi modułami zewnętrznymi, jak moduł pamięci RAM/ROM, sterowniki (kontrolery) urządzeń peryferyjnych, modułów doysterowania, rejestratorów wartości pomiarowych oraz koprocessorów arytmetycznych, powstają odpowiednie karty komputerowe dopasowane do problemu. Komponentami specjalnie zaprojektowanymi dla obróbki w czasie rzeczywistym są tzw. mikrokontrolery. Wszystkie ważne elementy są tu zintegrowane w jednym chipie. Specjalną architekturę do maksymalnego przepływu danych podczas obróbki arytmetycznej mają tzw. procesory sygnałowe. Potrzebują jednak dodatkowego interfejsu procesowego. Wzrost szybkości obliczeniowej osiąga się również przez obróbkę równoległą za pomocą np. transputerów lub procesorów sygnałowych.

Obok procesorów standardowych coraz większą rolę odgrywają układy przełączające projektowane dla konkretnych zastosowań (ASIC). W układach tych na jednym chipie umieszczone są pełne systemy mikrokomputerowe, dopasowane do danego problemu. Rozróżnia się tu programowalne urządzenia logiczne (PLD), odpowiednie dla prototypów lub małych serii, oraz tzw. semi-custom-devices (np. gate-arrays) dla średnich serii i tzw. custom-devices dla dużych serii produktu.

Elementy mikroelektroniczne, naniesione bezpośrednio na systemy mechaniczne, podlegają wysokim obciążeniom mechanicznym i cieplnym, mogą być zabrudzone przez kurz, wodę, olej. Dlatego decydujące znaczenie ma mechaniczne powiązanie tych elementów z systemem.

W większych systemach powstają, podobnie jak podczas automatyzacji dużych urządzeń, architektury podzielone hierarchicznie z komponentami mikroelektroniki powiązanymi odpowiednimi systemami magistral. Do określonych zastosowań powstają magistrale specjalistyczne.

Projekt oprogramowania

Oprogramowanie jest projektowane metodycznie, według zasad inżynierii oprogramowania. Rozróżnia się przy tym inżynierię wymagań (requirements-engineering), w której skład wchodzi: postawienie zadania, wymagania i zorientowana na zastosowanie koncepcja rozwiązania; sporządzenie struktury oprogramowania wraz z ustaleniem języka (zależnego od procesora) i na koniec implementacja (kodowanie) z testami i walidacją.

Funkcjonalna integracja procesu i elektroniki

Podczas funkcjonalnej integracji procesu i elektroniki należy rozróżnić integrację hardware'ową (z punktu widzenia sprzętu komputerowego), integrację konstrukcyjną komponentów oraz integrację software'ową (przez obróbkę informacji). Po przejściu przez etapy 2-7 należy tu jeszcze raz rozpatrzyć system jako całość i podział funkcji między proces i obróbkę informacji oraz, ewentualnie, dokonać modyfikacji w cyklu iteracyjnym. Typowymi mechatronicznymi punktami widzenia są przy tym np. tłumienie elektroniczne, linearyzacja przez algorytmy, wpływanie na wielkości niemierzalne, właściwości uczące.

Uproszczenie konstrukcji podstawowej

Należy teraz sprawdzić, czy można uprościć konstrukcję podstawową? Na przykład jej kinematykę (przez zdecentralizowane, oddzielne silniki napędowe, przez odrzucenie liniowych przekładni mechanicznych) i kompensację nieliniowej charakterystyki (przez odpowiednie algorytmy), przez zastosowanie konstrukcji lekkich, usunięcie mechanicznych członów tłumienia lub pamięci pośredniej i tłumienia na drodze elektronicznej oraz przez mniejsze wymagania co do precyzji sterowanych przebiegów przez pomiar i regulację.

Podniesienie niezawodności i bezpieczeństwa

Z powodu rosnącego obszaru funkcji, spełnianych w systemach mechatronicznych przez sensorykę, mikroelektronikę i aktorykę, coraz większe znaczenie przypada niezawodności i bezpieczeństwu. Zaczyna się to z reguły od metod wczesnego rozpoznawania uszkodzeń we wszystkich komponentach, szczególnie częściach elektronicznych. Niezawodność, ogólnie biorąc, można poprawić dwoma przedsięwzięciami: perfekcją i tolerancją. Perfekcja polega na unikaniu uszkodzeń i awarii przez odpowiednie rozplanowanie, wysoką jakość, mniej połączeń kablowych, sprawdzanie itd. Tolerancja powinna chronić przed skutkami błędów i awarii. Do tego można zastosować różne zasady redundancji w celu tolerowania uszkodzeń,

np. w sprzęcie komputerowym przez redundancję statyczną, dynamicznie pasywną czy dynamicznie aktywną. Celem jest utrzymanie pracy systemu lub osiągnięcie bezpiecznego stanu procesu. Do tego mogą służyć również przedsięwzięcia rekonfiguracyjne, a więc np. zmiany struktury w przypadku pracy awaryjnej.

Dopasowanie komponentów przez specjalistyczne narzędzia projektowania

Systematyczne, wzajemnie zgrane projektowanie wszystkich komponentów systemu mechatronicznego ułatwiają specjalistyczne narzędzia projektowania. Dotyczy to szczególnie równoległego w czasie opracowywania komponentów. Można przy tym zastosować np. następujące systemy oprogramowania: projekt konstrukcyjny komponentów mechanicznych i elektrycznych (CAD, CAE), modelowanie charakterystyk statycznych i dynamicznych, identyfikacja i szacowanie parametrów, komputerowo wspomagane projektowanie regulacji, symulacja systemu całkowitego i tzw. symulacja hardware-in-the-loop do opracowania i wypróbowania komponentów.

Eksperymentalna weryfikacja systemu

Eksperymentalna weryfikacja systemu mechatronicznego dotyczy zarówno sprawdzenia funkcji oraz niezawodności i bezpieczeństwa za pomocą sprawdzonych metod badania jakości. Często stosuje się do tego stanowiska badawcze a także przebiegi próbne w normalnej eksploatacji. Wspomagana komputerowo technika badań eksperymetalnych jest tu szczególnie ważna.

Przedstawione etapy nie muszą przebiegać w podanej kolejności. Projektowanie nie jest procesem sekwencyjnym lecz iteracyjnym, z wieloma skokami do przodu i do tyłu. Etapy 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12 odpowiadają na początku postępowaniu konwencjonalnemu. Następnie dochodzą nowe możliwości, powstające przez integrację i rozważania całościowe, a mianowicie etapy 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10 i 11.

Podsumowanie 2: Projektowanie mechatroniczne jako system działaniowy

Z punktu widzenia systemowej teorii techniki przydatny wydaje się podział projektowania mechatronicznego na następujące podsystemy:

- *Systemy rzeczowe* jako systemy, które należy zbudować – urządzenia mechatroniczne;
- *Systemy działaniowe* jako systemy, które ustalają systemy rzeczowe – podmioty działania (określone czynności projektanta, konstruktora, użytkownika i operatora);
- *Systemy określania celów* jako systemy celów, lub linie działań dla systemów działaniowych, postawione zadania (wymagania stawiane procesowi mechatronicznemu i urządzeniu mechatronicznemu);
- *Systemy informacyjne* jako systemy procesów informacyjnych, które zaopatrują inne systemy w informacje konieczne i gromadzą informacje przetworzone.

Z tego podziału widać, że każde zastosowanie mechatroniki można traktować jako system działaniowy, za którego pomocą realizowana jest zmiana określonych cech konwencjonalnego systemu rzeczowego.

Wiemy już, że system działaniowy się składa się z systemu określania celów, systemu informacyjnego i wykonawczego. Tak więc system mechatroniczny jest zbiorem celów, informacji i wykonań, za których pomocą realizowana jest określona zmiana konwencjonalnych maszyn. Cele tworzą przy tym system celów, informacje system informacji a wykonania system wykonawczy. System określający cele zawiera, ogólnie biorąc, wymagania dotyczące zmiany właściwości konwencjonalnych systemów rzeczowych. Parametry przed zmianą i po zmianie, parametry dotyczące efektów i osiągnięć różnych procesów mechatronicznych, urządzeń mechatronicznych, programy nowych zadań zastosowania tworzą, ogólnie biorąc, system informacyjny. Zmiany właściwości konwencjonalnych systemów rzeczowych dokonuje bezpośrednio system wykonawczy. Chodzi tu o przedsięwzięcia, których realizacja następuje przez zastosowanie różnych mechatronicznych środków pracy, czyli automatów mechaniczno-elektronicznych (mechatromatów).

6. Użytkowanie urządzenia mechatronicznego

Po przedstawieniu uwarunkowań, jakie towarzyszą powstawaniu urządzenia mechatronicznego, chciałbym teraz przejść do uwarunkowań związanych z jego użytkowaniem.

Użytkowanie urządzeń mechatronicznych jest systemem działaniowym, w którym planowana funkcja działaniowa przejmowana jest częściowo lub całkowicie przez mechatroniczny system działaniowy, którego elementem jest urządzenie mechatroniczne jako system rzeczowy. Powstaje w ten sposób socjotechniczny (socjomechatroniczny) system działaniowy, który zwykle realizuje funkcję pracy.

Użytkowanie urządzeń mechatronicznych rzeczy może być zdominowane przez cele lub przez środki. Możliwe są również formy mieszane, w zależności od hierarchii ludzkich systemów działaniowych rozróżniającej systemy osobowe, mezosystemy społeczne i makrosystemy społeczne. Towarzyszy temu *integracja socjomechatroniczna*, która przejawia się dwojako: (1) *zastępowaniem* (substytucją) pracy człowieka mechatronicznymi systemami działaniowymi oraz *dopełnianiem* (komplementacją) funkcji pracy o funkcje niedostępne dla człowieka a realizowalne mechatronicznymi systemami działaniowymi. Oba te sposoby można nazwać *zasadami mechatronizacji*.

W rozdziale tym chciałbym przybliżyć te zasady nie tyle od strony technicznej i organizacyjnej, ile od szeroko rozumianej strony kulturowej. Zrobię to przez sprowadzenie użytkowania urządzenia mechatronicznego do problemu zastępowalności działań człowieka przez mechatroniczne systemy rzeczowe. Przedstawię rolę mechatroniki w działaniach człowieka w aspekcie antropologicznym, etycznym i kulturowo-filozoficznym. Zajmę się przy tym takimi zagadnieniami jak sztuczna inteligencja i autonomia. Na koniec wykażę, że mechatronikę można traktować jako kulturę techniczną i jako działanie człowieka.

Problem zastępowalności człowieka

Mechatronika ma dla zrozumienia naszej osoby i naszej kultury znaczenie większe niż inne dotychczasowe technologie. W mechatronice, a szczególnie w jej centralnym obszarze – robotyce – wydaje się jakby człowiek zaczynał napotykać sam siebie. Odmiany takich spotkań można odnaleźć w mitach i fikcjach o sztucznym człowieku, jakie pojawiają się już od starożytności. Gdy mechatronika i robotyka symulują inteligencję człowieka i formy jego ruchu, to oddziałują, bezpośrednio lub pośrednio na obraz, jaki mamy o nas samych jako aktorach w przestrzeni społecznej. W swych skutkach mechatronika jest porównywalna z techniką genetyczną. Ta ostatnia już dziś wywołuje poważne problemy etyczne. Mechatronika rozwija się znacznie wolniej i wydaje się, że etyczny konfliktowy potencjał mechatroniki (robotyki) nie będzie tak duży jak potencjał techniki genetycznej.

Obraz mechatroniki w społeczeństwie jest bardzo mglisty. Jest on zdominowany przez robotykę, a sam obraz robotyki szczególnie przez roboty humanoidalne. Scenariusze zastępowania człowieka przez urządzenia mechatroniczne (szczególnie przez roboty) opierają się z reguły na różnym rozumieniu tych samych słów, na niejednoznacznej semantyce, która przykrywa prawdziwe stany rzeczy i konflikty. Istnieje wiele scenariuszy zastępowania człowieka przez roboty¹⁹. Abstrahując od możliwości technicznych projekty takie napotykają poważne zastrzeżenia etyczne. Dotykają bowiem podstawowych zagadnień etycznych: zgodności z naturą, zakazu instrumentalizacji, zagadnienia autonomii i godności osoby oraz odpowiedzialności za przyszłe pokolenia.

Scenariusze zastępowania człowieka przyczyniają się również do wzmocnienia uproszczonych opinii w rodzaju, że człowiek – w zależności od paradygmatu nauk przyrodniczych – nie jest niczym innym jak algorytmem swoich genów, maszyną biologiczną, opartym na węglowodanach, sprzętem i oprogramowaniem itp. Te redukcjonistyczne podejścia spotyka się w robotyce przede wszystkim w postaci pomieszania wizji robotycznych z rzeczywistością oraz pomieszania inteligencji człowieka ze sztuczną inteligencją.

W dyskusjach krytykujących technikę robotyka zajmuje miejsce szczególne. Po stronie krytyki kultury może ona liczyć na zróżnicowane opinie również w obszarach, które sceptycznie odnoszą się do techniki. To może zależeć przede wszystkim od tego, że robotyka i mechatronika przygotowują potencjały rozszerzenia ludzkich zdolności działaniowych i dają punkty zaczepienia dla projektów estetycznych. Ponadto roboty uważa się za „sztuczną sztukę”, w której mile widziana jest własna dynamika rozwojowa w sensie wzbogacenia kulturowego.

Urządzenia mechatroniczne (szczególnie roboty), jako produkty techniki, są konkretną odpowiedzią na pytanie: Jak chcemy żyć lub w jakich warunkach chcemy żyć. Kwestią otwartą pozostaje jednak to, czy odpowiedzi techniczne są poprawne etycznie, kulturowo, politycznie i technicznie. Nie oznacza to wcale, że robotyka jest jakimś niebezpiecznym, kulturowym ślepym zaułkiem. Trzeba tylko w nauce, polityce i społeczeństwie upowszechnić racjonalne powody rozwoju robotyki.

Robotyka a więc i mechatronika jest więc silnie umocowana w centralnych zagadnieniach społecznych. Dlatego podejście do mechatroniki powinno zawierać podstawowe decyzje normatywne. Chodzi przy tym o następujące zadania:

1. Wypracowanie etyki ludzkich form życia, szczególnie określenie granic technicznego przekształcania ludzkiego świata życia.
2. Nazwanie kryteriów społecznej zgodności (kompatybilności) urządzeń mechatronicznych, włączając kryteria dopuszczalnego komunikacyjnego i ruchowego ulżenia człowiekowi przez użycie np. robotów usługowych.
3. Określenie psychicznych, etycznych i estetycznych skutków użytkowania urządzeń mechatronicznych w przestrzeni społecznej.

¹⁹ Najbardziej znane to scenariusze MORAVECA [1999] i KURZWELLA [1999].

Aby wyrażenie „zastępowalność człowieka” i możliwe scenariusze zastępowalności poddać ocenie etycznej i filozoficzno-kulturowej, potrzebny jest antropologiczny punkt widzenia. Filozoficzna ocena robotyki i mechatroniki w sensie ogólnym, a scenariuszy zastępowalności w szczególności, wymaga złożonej analizy, która powiąże ze sobą perspektywy różnych dyscyplin filozoficznych – szczególnie antropologii filozoficznej, etyki i filozofii kultury.

Punkt widzenia antropologii filozoficznej

Antropologia filozoficzna zajmuje się zwykle szczególnym miejscem człowieka. Ale można też ją traktować jako podejście, w którym chodzi nie tyle o podstawę szczególnego miejsca człowieka, ile o identyfikację czy też rekonstrukcję właściwości i zdolności, którymi ludzka forma życia różni się od innych form życia czy układów funkcjonalnych (systemów rzeczowych). Podejście takie ukierunkowane jest bardziej na założenia nowej filozofii języka i filozofii ducha, a mniej na klasyczną antropologię filozoficzną SCHELERA, PLESSNERA czy GEHLENA.

Problem semantyki wyrażeń etycznych i technicznych

Rozważając innowacje techniczne czy też dyskutując o etyce techniki rzadko sięga się do poglądów i osiągnięć najnowszej teorii poznania i analizy języka. Dlatego często nie zauważa się, że semantyka wyrażeń etycznych i technicznych już na samym początku rozstrzyga o postawieniu problemu, który chce się rozwiązać. Filozofia języka przyjmuje, że ujęcie i identyfikacja jakiegoś stanu rzeczy zależy w sensie konstytutywnym od zastosowanych pojęć i klasyfikacji.

Pojęcia i cechy techniczne nie są żadnymi neutralnymi etykietami wartości, lecz wstępnie formują spostrzeganie, interpretację i podejście do istoty rzeczy. Nieuzasadniony sposób użycia takich terminów antropologicznych, jak „świadomość”, „wiedza”, „forma życia”, „intencjonalność”, „agent”, „autonomia”, „sztuczna osoba” itd., może prowadzić do niezrozumienia podstawowych różnic między człowiekiem a maszyną i przez to wywoływać problematyczne formy reakcji. Widać to nie tylko w scenariuszach zastąpienia ludzkiej formy życia przez nowe „generacje” komputerów i robotów.

Prawdziwe określenia antropologiczne muszą być semantycznie odgraniczone zarówno od mechanicznej („sztuczny”, „maszyna” itp.), jak również od biologicznej gry językowej („życie”, „samozachowanie” itp.). Ponadto trzeba uwzględnić semantyczne formy mieszane, które w ukrytej formie zawierają tezy naukowo- i społeczno-polityczne. Chodzi tu o takie wyrażenia jak „zastępowalność człowieka”, „systemy autonomiczne” i „roboty autonomiczne”.

Wyrażenie „zastępowalność człowieka” niesie z sobą szereg zastanawiających semantycznych form wstępnych. Bliskość robotyki do konstrukcji humanoidalnych wyzwala szereg skojarzeń i konotacji, które przekraczają dostępną przestrzeń możliwości. Zastępowalność nie może się odnosić wyłącznie do funkcji specyficznych, które i tak są już spełniane przez stronę techniczną. Semantyka nasuwa jednak przekonanie, że człowiek jako taki może lub powinien być zastąpiony.

Szybki rozwój tzw. sztucznej inteligencji i robotyki wymaga oczywiście dokładnego zarysowania granic semantycznych ludzkiej formy życiowej. Takie zarysowanie decyduje właśnie o zastępowalności i niezastępowalności. Odpowiedzi na normatywne pytania o powszechnie rozumianej zastępowalności człowieka zakładają „mocny opis” ludzkiej formy życia. Podczas gdy „słaby opis” jest tylko zestawieniem danych empirycznych, uzyskanych przez obserwatora na powierzchni zachowania, opis mocny ujmuje wewnętrzne zależności systemu języka, zachowania, rozumienia i działania. W kontekście antropologicznym taki opis można nazwać mocnym tylko wtedy, gdy uwzględni się semantykę wyrażania i rozumienia ludzkiej formy życia. Tylko w opisie mocnym mogą się ujawnić specyficznie ludzkie cechy i podstawowe uzdolnienia, które pozwalają poznać psychiczną i społeczną rzeczywistość ludzkiej formy życia w odróżnieniu od porządków sztucznych.

W mocnym opisie ludzka forma życia okazuje się wielowarstwowym systemem współzależności świadomościowych, rozumieniowych i działaniowych. System ten, a szczególnie podstawowe pojęcia życia osobowego oraz przestrzeni rozumowej (powody) stawiają wysoką poprzeczkę projektom zastępowalności i symulacji.

Inteligencja ludzka, a inteligencja sztuczna

Podstawowe pojęcia opisu mocnego niosą skutki dla analizy inteligencji ludzkiej i jej odróżnienia od inteligencji sztucznej. Z powodu opisu mocnego inteligencja ludzka nie istnieje bez semantyki powodów. Semantyka powodów (Semantik der Gründe) jest mocno wrośnięta w ludzką formę życia. Żaden jednak znany agent software'owy czy robot nie ma aktywnych powodów. Inaczej brzmiące podporządkowania opierają się wyłącznie na traktowaniu czegoś niebędącego rzeczą jako rzeczy, czyli na reifikacji zwrotów metaforycznych. Niemetaforyczne sposoby użycia pojęcia *inteligencja* mogą się odnosić wyłącznie do osób, które mają takie zdolności jak subiektywność, cielesność, emocjonalność, racjonalność i moralność.

Inteligencja ludzka nie jest tylko zwykłą zdolnością komunikowania się. To złożony, skomplikowany splot nastawień, działań i procesów rozumienia. W reaktywnych postawach, takich jak radość, oburzenie, żal, wstyd itd. wyraża się wymiar ludzkich powodów. Wymiar ten odzwierciedla się również w inteligentnych grach językowych. Systemy informacyjne, które nie sięgają tych określeń, nie tracą jeszcze nic z przypisanych im funkcji, ale nie zasługują na określenie „inteligentny”. Jeśli zdolność komunikowania przypuszczalnie różni robot od czystego automatu, to jest to właśnie ten powód, który odróżnia inteligentną formę życia od sztucznej inteligencji. Innym nieredukowalnym elementem inteligencji ludzkiej są świadome reprezentacje.

Różnice między inteligencją sztuczną a inteligencją człowieka można opisywać nie tylko z perspektywy tej ostatniej, ale odwrotnie. Można spojrzeć na inteligencję i mądrość człowieka z punktu widzenia najnowszych pojęć techniki komputerowej i inżynierii oprogramowania. Jednym z takich spojrzeń jest model zaproponowany przez DUECKA [2003].

Według tego modelu całościowy obraz człowieka składa się z trzech jednostek: (1) myślenie analityczne rezyduje w podobnej do komputera lewej połowie mózgu;

(2) kreatywna intuicja siedzi jako dana przez naturę sieć neuronowa w prawej połowie. Człowiek myśli tam, dokąd prowadzi go trzeci system: (3) hiperszybki identyfikator symptomów alarmuje uwagę podczas niebezpiecznych zdarzeń, nieświadomie, bez myślenia.

Komputer tkwiący w nas funkcjonuje jak normalny komputer osobisty (PC). Wylistowuje wiedzę i sposoby wnioskowania, zna reguły i tradycję. „Pecetowska” inteligencja odpowiada myśleniu analitycznemu lub inteligencji logicznej, ostrej, wyważającej.

Inna maszyna w człowieku wygląda jak sieć neuronowa. Sieci neuronowe są konstrukcjami matematycznymi przypominającymi mózg człowieka. Sieci neuronowe mogą dobrze podejmować decyzje. Odpowiadają Tak lub Nie na określone pytania, nie mogą jednak podać powodu *dlaczego* tak zdecydowały. Jest to uderzająco podobne do myślenia intuicyjnego u człowieka, myślenia całościowego, gdy mówimy: „Mam przeczucie. Wiem dokładnie, że to tak jest. Nie wiem dlaczego. Po prostu wiem.”

Trzecia maszyna zauważa „mimowolnie”, co należy czynić. Kieruje nas „nieświadomie”, wyczuwa Niebezpieczne, Nagłe, Zagrożające, wietrzy szansę i sukces. Maszyna ta melduje się przez ciało. Kłuje w serce, czyni ból brzucha, inicjuje płomienny zachwyty. Metaforą tego mogą być algorytmy identyfikacyjne opracowane dla teorii informacji. Są to niewiarygodnie szybkie sposoby rejestrujące coś natychmiast. *Ale one nic nie poznają*. Dlatego są szybkie jak błyskawica. One rejestrują tylko: gorąco, zimno, niebezpiecznie, źle, dobrze, grozi nagana, idzie szef, „fajny facet”. Powiadają nas fizjologicznie przez ciało: Wydzielić adrenalinę! Ogłosić pogotowie do walki!

Istnieją próby, żeby myślenie komputerowe i myślenie intuicyjne powiązać z asymetryczną strukturą mózgu. Lewa połowa mózgu myśli „analitycznie”, prawa „całościowo”. Objaśniam te powiązania w książce za pomocą prostych struktur matematycznych i prostych metafor. Ta trzecia maszyna jest prezentowana po raz pierwszy. Jest ona postulowana przez Antonio DAMASIO w jego pionierskim dziele „Descartes’ Irrtum”, w którym przedstawia istnienie „znaczników somatycznych”. W przedstawieniu trzeciej „maszyny” jest coś całkiem nowego, istotnego dla zrozumienia człowieka. Trzecia maszyna po prostu rozstrzyga (podejmuje decyzje), bez przemyślenia wszystkiego, nawet w ogóle bez myślenia. Patrząc matematycznie można by powiedzieć, że wiedza nie jest konieczna do czystego podejmowania decyzji. W walce z wolną naturą myślenie jest zbyt powolne.

Silnie intuicyjni ludzie działają jak „geniusze”. Silnie analityczni promieniują jak menedżerowie lub „rodzice”. Ludzie silnie żyjący w swoich sensorach cielesnych są jakby pozostali dziećmi i rozkwitają w radości życia.

Z analizy antropologicznej wynika jednak, że ludzka forma życia dysponuje właściwościami i zdolnościami, które nie dają się zastępować i symulować. Dlatego podczas etycznej oceny scenariuszy zastępowalności należy przede wszystkim mieć na uwadze takie właściwości i zdolności, jak: świadomość, refleksja, reaktywna emocjonalność, doświadczenie, praktyczny rozsądek oraz możliwość stawiania celów.

Zastępowalność człowieka powinna następować na drodze nienaturalnej, a człowiek jest przecież określoną przez naturę formą życia z podstawowym uzdolnieniem do kultury. Dlatego już z powodu samej semantycznej spójności nie może być mowy o dosłownej zastępowalności. Tego stanu rzeczy nie zmieniają nawet najbardziej daleko idące rewolucje biotechnologiczne. Pojedyncza osoba być może kiedyś będzie mogła być reprodukowana za pomocą techniki genetycznej. Jej wewnętrzna perspektywa pozostanie jednak przez to nienaruszona. Jest ona numerycznie prosta i jako subiektywna perspektywa przeżycia samoświadomości nie daje się powielać. Ludzie klonowani z własnych komórek byliby być może podobni, ale jednak byłyby to różne osoby. Dlatego gra językowa zastępowalności nie powinna być kontynuowana ani spekulatywnie ani praktycznie. W robotyce i mechatronice chodzi więc nie o generalne zastępowania, lecz o *przemieszczenia, nowe ujęcia i wykonywanie funkcji lub czynności*, których człowiek w porównywalny sposób nie może lub nie powinien wykonywać.

Punkt widzenia etyki

Antropologia humanistyczna zajmuje się jądrem ludzkiej formy życia, które powinno być pod etyczną ochroną rozumu praktycznego. Rozum praktyczny (*praktische Vernunft*) objawia się głównie w konstrukcji i rekonstrukcji norm, motywacji i zastosowań. Przejście od antropologii humanistycznej do etyki i jej zastosowania może być dla przyszłych generacji dyskusyjne, gdy rozważy się pojęcia naturalności, godności, autonomii i odpowiedzialności.

Naturalność

W etyce stosowanej często stosuje się takie pojęcia i wyrażenia jak: natura, naturalność czy zgodność z naturą. Semantyka tych pojęć jest jednak często niejasna. Z pojęciami tymi wiąże się jednak rozpoznawalne intencje ograniczające (limitatywne), skierowane ku określonym granicom wymagalności etycznej, które w ramach konwencjonalnych procesów decyzyjnych i działaniowych nie powinny być stawiane do dyspozycji. Chodzi tu przede wszystkim o etyczne ograniczenia możliwości technicznych.

Do tego kontekstu należy również podejście do ciała ludzkiego. Osoby mają nie tylko ciało – poniekąd jako czystą materialną podstawę ich świadomości – lecz prowadzą swe życie jako osoba ze swoim ciałem. W warunkach społecznych cielesności nie można zrównywać z naturalnością. Zgodne z naturą obchodzenie się z własnym życiem na pewno jednak nie obejdzie się bez uciążliwości dotyczących cielesności.

W niedalekiej przyszłości zgodne z naturą obchodzenie się z własnym ciałem może być „przekazane” w działanie mechatronice, biologii i medycynie. Niezależnie od transplantów zwierzęcych i ludzkich do dyspozycji może być duża liczba organów sztucznych i części zamiennych, które zastąpią lub wspomogą funkcje biologiczne. O idących z tym w parze możliwościach substytucji nie można dziś jeszcze powiedzieć, że są przejrzyste i pożądane. Za kilkanaście lat sytuacja może się

jednak radykalnie zmienić. Dlatego naturalność i zgodność z naturą mogą stać się ważnymi kryteriami oceny zastosowań mechatroniki.

Autonomia i zakaz instrumentalizacji

Zakaz instrumentalizacji powinien z założenia etycznego chronić autonomię osoby. Pojęcie autonomii oznacza pierwotnie stan rzeczy, w którym osoba w perspektywie pierwszej osoby przyjmuje punkt widzenia osoby trzeciej po to, aby dla siebie i innych osób ustalić zasadę moralną, mającą określać reguły życia i plany życiowe. W znaczeniu rozsądnie określanego samostanowienia zasad pojęcie *autonomii* należy ekstensjonalnie i intencjonalnie odróżniać od pojęcia *samoorganizacji* i *samosterowania*. Pojęcie to bowiem nie odnosi się jednorazowo bezpośrednio do pojedynczych epizodów działania, lecz ustala ich reguły i zasady.

Z punktu widzenia przeniesienia pojęcia autonomii w inne konteksty znaczeniowe, szczególnie w kontekst robotyki i mechatroniki, STURMA [2001] rozróżnia następujące rodzaje autonomii:

1. *Autonomia techniczna*. Ma ona miejsce w przypadkach złożonej automatyzacji z technicznie wprowadzonymi stopniami swobody. Właściwość autonomii dotyczy tu właściwości maszyny do wykonywania sterowań i akcji w określonych przestrzeniach ruchu.
2. *Autonomia osobowa*. Właściwa autonomia oznacza zdolność osoby do przyjmowania spontanicznych postaw i wykonywania działań, które w zasadzie są nieprzewidywalne. Autonomia osobowa przejawia się w postaci działań w przestrzeni powodów (przyczyn, racji, pobudek). Nie muszą one być określone moralnie lub rozsądne w sensie wąskim.
3. *Autonomia idealna w królestwie celów*. Działania w przestrzeni powodów mogą być przedmiotem samostanowienia moralnego w sensie imperatywu kategorycznego.²⁰ Działania osób w warunkach tej autonomii określone są wyłącznie moralnie. W idealnych warunkach działania te łączyłyby się w integralną jedność. Modelami idealnej autonomii są: umowa społeczna ROUSSEAU i królestwo celów KANTA.

W kontekstach robotyki i mechatroniki nie uwzględnia się z reguły tych rodzajów autonomii. Semantyczny obszar pojęcia autonomii jest zawężany do niewłaściwego sposobu zastosowania. „Autonomia” już jest wtedy stosowana, gdy robot sam, na podstawie swej sensoryki i właściwości systemowych, może wykonywać ruchy i czynności. Pierwotne znaczenie pojęcia autonomii, polegające na wyrażaniu uzasadnionego samostanowienia, jest natomiast istotnie węższe i normatywnie bardziej wymagające.

Również w perspektywie doświadczenia codziennego autonomię przypisuje się osobie wtedy, gdy z dobrze uzasadnionych powodów wykorzystuje ona przestrzenie pojmowania i przestrzenie działania. Ludzką formę życia cechuje zdolność do

²⁰ Imperatyw kategoryczny kładzie u podstaw ludzkiego działania zasadę *moralną*: „działaj według maksymy, która może się stać zasadą ogólną”. [KANT 1785].

własnego określania samego siebie i formułowania praw, niezależnie od impulsów zewnętrznych i wewnętrznych, zasad i maksym, według których ma być prowadzone własne życie. Już sam fakt, że podstawowe pojęcie etyczne, które zawsze ściśle wiąże się z koncepcją praw człowieka, zostaje wyrwane ze swego kontekstu semantycznego, może wskazywać na techniczny syndrom usamodzielnienia. Nic bowiem jak dotąd nie wskazuje na to, że w sztuczny sposób, tylko z samego założenia, maszynom przypisano samostanowienie zasad.

Punkt widzenia filozofii kultury

Praktyka kulturowa a rozwój robotyki i mechatroniki

Rekonstrukcja antropologicznych określeń ludzkich form życia wymaga wiedzy o głębokiej różnorodności inteligencji człowieka. Dlatego proponuję tu ująć robotykę i mechatronikę wyłącznie jako narzędzie lub środek dla ludzkich celów – tym bardziej, że obecny stan rozwoju techniki nie dopuszcza żadnego innego objaśnienia. Przesadne, emfatyczne akcentowanie sztucznego zastąpienia inteligencji ludzkiej, jakie miało miejsce we wczesnych badaniach sztucznej inteligencji i nadal spotyka się w różnych spekulacjach, nie odgrywa w robotyce praktycznie żadnej roli. Niezależnie od tego należy sprzeciwić się próbom spekulatywnego zrównania przepaści między inteligencją ludzką a sztuczną, czy próbom taktowania tego zrównania jako celu kulturowego²¹.

Szybka i nieprzemysłana orientacja na wąskie modele inteligencji, spotykane w badaniach sztucznej inteligencji, nie wydaje się korzystna dla robotyki i mechatroniki. W badaniach tych inteligencji powstaje wiele pomysłów i modeli sztucznej inteligencji, według których szczegółowo rozwija się sprzęt i oprogramowanie. Takie zorientowanie prowadzi do jednostronnego spojrzenia na zjawisko inteligencji; nadal rozpoznawalny jest silny trend mimetyczny, polegający na symulacji i imitacji rzekomych osiągnięć inteligencji człowieka.

Temu mimetycznemu założeniu przeczy jednak narzędziowy charakter sztucznej inteligencji, robotów i innych urządzeń mechatronicznych. Nie powinno to jednak prowadzić do tego, że specyficznym cechom sztucznej inteligencji będzie się poświęcać mniej uwagi. Stosunki między człowiekiem a maszyną ustalają się według scenariuszy naśladowania lub symulowania. Rozsądny i etycznie usprawiedliwiony stosunek człowiek-maszyna sprowadza się jednak nie do naśladowania, lecz do poszerzenia przestrzeni działania człowieka.

Z powodu zasadniczej odmienności inteligencji ludzkiej i sztucznej należy dążyć do równoległego rozwoju ludzkości i mechatroniki. Właśnie z punktu widzenia interesów robotyki i mechatroniki marzenie o sztucznym człowieku powinno być zamienione na konkretne projekty rozszerzenia przestrzeni działania człowieka. Takie rozszerzenie oznacza jednak również przesunięcie interfejsu człowiek-maszyna. Chodzi tu przede wszystkim o komputerowo wspomaganą uzewnętrznienie czynności poznawczych człowieka; krótko mówiąc o eksternalizację procesów kognitywnych.

²¹ por. [MORAVEC 1999] i [KURZWEIL 1999]

Taka teoria rozszerzenia może nawiązywać do rozwoju ekspansywnych urządzeń mechatronicznych; urządzeń, które mogą operować w mikro- i makroobszarach, gdzie bezpośrednio działania są dla człowieka niedostępne lub mogą stanowić zagrożenie.

Mechatronika – bardzo spektakularnie (pod postacią robotyki) i stosunkowo cicho (pod postacią innych urządzeń mechatronicznych) – coraz silniej wpływa na rozwój naszej kultury. Rozwój mechatroniki wzmacnia tendencję kultury ludzkiej do usamodzielnienia się od otoczenia przyrodniczego. To usamodzielnienie już powoduje, i będzie powodować, automatycznie wiele problemów moralnych, estetycznych, ekonomicznych i ekologicznych. Idące wraz z mechatroniką substytucje i ekspansje należy więc zawsze poddawać sprawdzeniom etycznym i kulturowym. Potrzebna jest też permanentna dyskusja o tym, jaki typ inteligentnego zachowania w przestrzeni społecznej należy wzmocnić. Czy urządzenia mechatroniczne powinny symulować, kopiować lub modyfikować inteligencję ludzką, która przez tysiące lat rozwijała się we współgraniu języka, spostrzegania oraz koordynacji cielesnej i społecznej? Proponowana tu koncepcja inteligencji mechatronicznej, jako wspomaganie i rozszerzanie działania człowieka, sugeruje rozwój pewnej formy sztucznej inteligencji, która leży poza inteligencją ludzką.

Mechatronika jako kultura techniczna

Rozwój mechatroniki oferuje rzadką szansę dokonania normatywnej korekty jeszcze w stadiach początkowych. Szansa ta została zaprzepaszczona podczas wielu innowacji technicznych. Rozwój mechatroniki nie powinien więc ewoluować w sposób niekontrolowany. Cele kulturowe należy określić tak, aby urządzenia mechatroniczne mogły funkcjonować jako środki realizacji tych celów. Podróż kosmiczna są tu dobrym przykładem takiego postępowania. Aby urządzenia mechatroniczne ustanowić narzędziami procesu kulturowego, potrzebna jest kooperacja mechatroniki i oceny techniczno-etycznej. Mechatronika będzie się rozwijać jako proces kulturowy jednak tylko wtedy, gdy stanie się przejrzysta w przestrzeni publicznej jako element kształtowania oczywistych procesów społecznych.

Oprócz swoich konkretnych zastosowań mechatronika jest w stanie pokazać określony obraz stosunku inteligencji ludzkiej do inteligencji sztucznej. Modele porównawcze w postaci agentów oprogramowaniowych i robotów stały się powodem i tłem dla rekonstrukcji specyficznie ludzkich stanów świadomości i przyczyniły się przez to do lepszego zrozumienia ludzkiej formy życia. Określenie prawdziwie ludzkich modeli świadomości będzie wtedy ukazywać również granice symulowalności i zastępowalności człowieka. Chodzi tu przede wszystkim o emocjonalność, subiektywność, moralność i kulturę człowieka. Równoległość rozwoju człowieka i rozwoju mechatroniki skończyłaby się w chwili, gdy roboty i inne urządzenia zaczęłyby dysponować samoświadomością, co oznacza, że byłyby w stanie różnicować powody działania i działać według nich.

W dającej się przewidzieć przyszłości urządzenia mechatroniczne należy widzieć po prostu jako maszyny, które w szczególnych warunkach mogą dysponować własnymi drogami rozwoju. Pomimo wymagań dotyczących antropomorficznej natury

niektórych urządzeń mechatronicznych (roboty humanoidalne), ich użytkowanie poza klasycznymi stosunkami człowiek-maszyna pozostaje nadal problematyczne z etycznego i społecznego punktu widzenia. Mam tu na myśli problem naruszenia zakazu instrumentalizacji oraz to, że usprawiedliwione wdrożenie w przestrzeń społeczną i cele kulturowe może się nie udać. Dotyczy to przede wszystkim stosunków: człowiek-człowiek, człowiek-zwierzę i człowiek-środowisko. Transformacja stosunku człowiek-człowiek w stosunek robot-człowiek jest znacznie trudniejsza niż transformacja w stosunek człowiek-robot-człowiek. Można to zobaczyć z jednej strony w substytucyjnym użyciu robotów usługowych w domach opieki z drugiej zaś w tak zwanej medycynie małoinwazyjnej.

Naruszenie zakazu instrumentalizacji ma postać scenariuszy manipulacji niektórych zastosowań robotów zabawkowych. Robot-pies AIBO jest przykładem instrumentalistycznego zrównania i ekonomicznie motywowanego przekroczenia granic między rodzajem naturalnym a maszyną. Skonstruowane przebiegi ruchu psa AIBO nasuwają wnioski o życiu wewnętrznym, którym przecież maszyna nie dysponuje.

Problemów nie powinno sprawiać zastosowanie urządzeń mechatronicznych (mechatromatów) tam, gdzie stosuje się od dawna maszyny klasyczne. Stosunek człowiek-maszyna można łatwo przekształcić w stosunek człowiek-mechatromat lub człowiek-mechatromat-maszyna. Również stosunek człowiek-maszyna-człowiek da się prawdopodobnie bezproblemowo przekształcić w stosunek człowiek-mechatromat-człowiek lub człowiek-mechatromat-maszyna-człowiek. Zastosowanie mechatromatów jest problematyczne wszędzie tam, gdzie człowiek zastępowany jest funkcjonalnie w stosunkach człowiek-człowiek. Sytuacja zmienia się zasadniczo, gdy mechatromaty są w stanie istotnie rozszerzyć opcje działania człowieka w sytuacjach operowania i opieki.

Z powodu zakazu instrumentalizacji potrzebne są ścisłe granice zastosowania mechatromatów w sytuacjach opieki. Tam, gdzie mechatromaty istotnie przyczyniają się do samodzielności osób upośledzonych czy wymagających opieki, zakaz instrumentalizacji nie wchodzi w grę. Opieka maszynowa kryje jednak niebezpieczeństwo zaniechania, co czyni pacjenta zwykłą rzeczą. Stąd oczywista wydaje się zasada, że ludźmi powinni opiekować się ludzie, a nie maszyny. Mechatromaty powinny więc być tylko narzędziami w opiece i stosowane do zachowania samodzielności osób potrzebujących opieki, np. w środowisku domowym.

W robotyce i mechatronice zawarte są zarówno tendencje do rozszerzenia świata życia ludzi jak i tendencje do jego odhumanizowania. Bezproblemowe jest rozszerzenie przede wszystkim w obszarze przestrzeni kosmicznej, energii jądrowej, głębin morskich. Problemy dehumanizacji dotyczą robotów usługowych i w małej części robotów przemysłowych. W robotyce przemysłowej dopiero od niedawna rozważa się stronę socjoekonomiczną, która maksymalizacji zysku i wzrostowi jakości przeciwstawia utratę miejsc pracy. W robotyce usługowej kryteria powinno się wyraźnie różnicować na dwa kierunki: (1) usługi pomocnicze i wspomagające autonomię, np. wózki inwalidzkie, protezy itp., oraz (2) nie dające się usprawiedliwić dehumanizacji otoczenia społecznego, np. całkowicie zautomatyzowane sta-

cje opieki w domach opieki i szpitalach. W tych przypadkach zalecana jest również etyczna ocena relacji koszty-korzyści w leczeniu.

Mechatronika jako działanie człowieka

Podczas użytkowania sztucznej inteligencji, a szczególnie urządzeń mechatronicznych, należy wyjaśnić problem kompetencji decyzyjnych dla każdego pojedynczego przypadku. Przede wszystkim należy zapytać, czy i w jakich warunkach kompetencja decyzyjna człowieka powinna być przeniesiona na maszynę. Pytanie to wiąże się ściśle z semantycznym postawieniem problemu. Na przykład wyrażenie *agent autonomiczny* niesie z sobą pewne ustalenia i wstępne ukształtowanie zachowania: między innymi instrumentalne zredukowanie autonomii do zwykłej zależności funkcyjnej, usunięcie przestrzeni powodów oraz zrównanie strukturalnej różnicy między osoby i nieosoby.

Problem podziału kompetencji w stosunku człowiek-maszyna jest podstawowy dla syndromu tak zwanej technologii agentów. Będzie on miał skutki dla akceptacji mechatroniki w przestrzeni społecznej. Dotyczy to przede wszystkim robotów usługowych. Obecna sytuacja w niczym nie wskazuje na to, że roboty można traktować jako „agenty” społeczne.

Dla technicznego przetworzenia kompetencji decyzyjnych duże znaczenie ma postać architektury interfejsu bądź sterowania programowego. Aby ludzie mogli ponosić odpowiedzialność za funkcjonowanie mechatromatów, te ostatnie muszą być przejrzyste, przewidywalne i kontrolowalne. Dlatego punktem wyjścia nie może być komplementarny stosunek między człowiekiem a mechatromatem. Przy założeniu ludzkiej kompetencji w zakresie celów kulturowych, społecznych i politycznych, oraz przy istnieniu zakazu instrumentalizacji stosunki człowiek-maszyna nigdy nie mogą być komplementarne.

Wprowadzenie pojęcia komplementarności w stosunkach człowiek-maszyna musi skutkować również odwróceniem ciężaru dowodowego w kształtowaniu systemów i techniki. Podczas ustalania zaniechań człowieka nie należy po prostu wychodzić z bardzo ścisłego pojęcia techniki. To nie technika jest winna. Jej jest wszystko jedno. Winny jest zwykle człowiek. Trzeba tak samo zapobiegać redukowaniu ludzkiej kompetencji decyzyjnej jak rozszerzaniu szarych stref decyzyjnych.

Jeśli technika, zgodnie z zakazem instrumentalizacji, nie chce spowodować lub wzmocnić żadnego pierwszeństwa środków technicznych przed ludzkimi celami, to musi się przyczyniać do utrzymywania ponadczasowych wartości humanistycznych. Wartościom tym, po stronie techniki, odpowiadają jasne narażenia i zagrożenia. Przyczynę techniki do świata życia i świata środowiska będzie się ustalał w zrównoważonym stosunku między potencjałem innowacyjnym techniki a pożytkiem z każdej formy życia. Przy takim punkcie widzenia mechatronika oferuje dobre perspektywy rozwoju, gdyż wnosi mniej obciążeń etycznych i ekologicznych niż inne techniki.

Ponieważ w systemach informacyjnych opartych na elektronicznym przetwarzaniu danych żadne normatywne wytyczne same nie mogą się rozwinąć, należy opraco-

wać scenariusze, które będą orientować i porządkować idee i pomysły rozwojowe w obszarze zastosowania. Podczas rozwoju sprzętu i oprogramowania konieczne jest różnicowanie adresatów; chodzi tu zarówno o różnice między ekspertami a laikami, jak i między różnymi poziomami umiejętności poznawczych. Oprócz różnic indywidualnych ważne są też konteksty społeczne, stany emocjonalne, różnice kulturowe i różnice płci.

Rozwojowi sztucznej inteligencji i mechatroniki towarzyszą dwa dalsze zagrożenia. Dotyczą one tego, co nazywa się po angielsku *de-skilling*. Chodzi tu o to, że zastosowanie komputerów i urządzeń mechatronicznych prowadzi do stopniowego, powszechnego rozcieńczenia i ubytku zdolności rzemieślniczych, kompetencji i intelektualnej zdolności różnicowania. Innym zagrożeniem jest jednostronna orientacji na modele sztucznej inteligencji, które operują tylko małym wycinkiem inteligencji ludzkiej, co automatycznie prowadzi do scenariuszy redukcjonistycznych. Zagrożenia te zbiegają się po dużej części z zastrzeżeniami dotyczącymi rozwoju techniki.

Po stronie technicznej zastrzeżenia tego rodzaju traktuje się często jako straszenie scenariuszami apokaliptycznymi. Niektórzy projektanci zajmujący się sztuczną inteligencją i mechatroniką odbierają zastrzeżenia motywowane społecznie czy kulturowo nie jako możliwe orientacje, lecz odrzucają od samego początku jako ideologiczne utrudnienia procesów innowacyjnych. Wyważenie możliwości i zagrożeń sztucznej inteligencji i mechatroniki powinno odbywać się poza ekstremalnymi scenariuszami upadku kultury i obojętności etycznej. Szczególnie w obszarze rozwoju oprogramowania i projektowania wspomaganego komputerowo należy dokończyć zmian, które uformują sztuczną inteligencję i mechatronikę jako kontrolowane rozszerzenia zdolności człowieka.

Jeżeli urządzenia mechatroniczne mają być użytkowane jako przedłużenie lub wspomaganie działania człowieka, to potrzebne jest ostre rozróżnienie między trzema sytuacjami: (1) działaniem, (2) zwykłym reagowaniem na przymus sytuacji i (3) przebiegami mechanicznymi. Do takiego rozróżnienia można dojść tylko przez złożone dyskusje, które wzajemnie połączą perspektywę filozoficzną, techniczną i społeczną. W dyskusjach tych tak samo ważne są poprawne zjawiskowo opisy zagadnień jak i jasne normatywne orientacje.

Dyskusja o przedłużeniu i wspomaganie działania człowieka przez mechatronikę jest reakcją na często podnoszony zarzut, że w ogóle nie powinno być żadnego obiektywnego oceniania skutków techniki. Rozprawianie o społecznych i etycznych implikacjach mechatroniki nie musi opierać się na niewymiernym pojęciu obiektywności i na neutralności wartości. Duża liczba miar etycznych, wymaganych dla takiego rozprawiania, czyni wiele pozycji moralno-filozoficznych skłonny do konsensu. Również udział w dyskusji tych, których bezpośrednio to dotyczy, nie może być kwestionowany choćby ze względów etycznych i należy go odrzucić z punktu widzenia tworzenia interesów.

Włączenie mechatroniki w konteksty działania człowieka wynika z podstawowego założenia normatywnego, że narzędzia powinny być dopasowywane do ludzkich zdolności i właściwości i że człowiek nie powinien się na przykład dostrajać do narzędzi, które wykształciły się przez tak zwane usamodzielnienie techniczne. W ta-

kich sytuacjach decyzyjnych ujawniać się będzie konkretne oddziaływanie zakazu instrumentalizacji na techniczne (mechatroniczne) scenariusze działania. Technika i określanie celów przez człowieka są bowiem dwiema przeciwbieżnymi zjawiskami, choćby tylko z powodów teorii zaprzeczającej ich powiązaniu.

Podsumowanie

Użytkowanie urządzenia mechatronicznego sprowadziło do zagadnienia zastępowalności człowieka przez urządzenia mechatroniczne. Zrobiliśmy to z perspektywy antropologicznej, etycznej i kulturowo-filozoficznej. Zaczęliśmy od pojęciowych podstaw dla dyskusji o „scenariuszach zastępowalności” z punktu widzenia filozofii antropologicznej. Następnie przeciwstawiliśmy inteligencję człowieka inteligencji sztucznej. Doprowadziło to nas do wniosku, że w obecnych warunkach technicznych ludzka forma życia nie daje się sztucznie reprodukcować. Z zasadniczych powodów odrzuciliśmy wyobrażenie o zastępowalności człowieka. Z punktu widzenia etyki stosowanej prowadzi do to zakazu instrumentalizacji, który w sensie kantowskiego imperatywu kategorycznego chroni autonomię i godność osoby. Mając na uwadze odpowiedzialność za przyszłe generacje, uznaliśmy, że nieusprawiedliwione jest konstruowanie sztucznie inteligentnych systemów, które przeważają nad człowiekiem w sensie (lub w mierze) pozwalającym na usunięcie człowieka jako formy życia. Ukazaliśmy trzy rozumienia autonomii: techniczne, osobowe i idealistyczne. Z kulturowo-filozoficznego punktu widzenia pokazaliśmy, że sztuczna inteligencja i mechatronika mogą tylko zyskać na pożegnaniu się ze scenariuszami zastępowalności człowieka i zamiast tego powinny zająć się konkretnymi projektami, w których centrum stać będzie przedłużenie i wspomaganie działań ludzkich.

7. Podsumowanie

Ogromna większość prób rozumienia i przedstawienia mechatroniki i urządzeń mechatronicznych ma charakter cząstkowy, jednowymiarowy. Brakuje obszernego szkieletu orientacyjnego, który odpowiadałby zarówno wielowymiarowości mechatroniki jak też leżącej u jej podstaw pewnej jednolitości wewnętrznej. Skutek – przez drzewa (mechanika, automatyka, elektronika, informatyka itd.) nie widzi się lasu jakim jest mechatronika, wielopostaciowego splotu jej zjawisk, uwarunkowań i następstw.

Dotychczasowe podejścia traktują mechatronikę przede wszystkim z punktu widzenia wąsko rozumianej techniki rzeczowej. Brakuje w nich z reguły odniesienia do pracy, człowieka i społeczeństwa, czyli ujęcia z punktu widzenia techniki szeroko rozumianej, jako system socjotechniczny. Dlatego wyjaśniam najpierw szerokie pojęcie techniki mechatronicznej, które obejmuje zarówno użyteczne, sztucznie zrobione rzeczy, jak również socjokulturowe uwarunkowania działania, w których te rzeczy powstają i są użytkowane. Mechatronika ma wymiar techniczny, biologiczny, ludzki i społeczny. Każdy z tych wymiarów może być potraktowany z różnych perspektyw poznawczych. Żadna z tych perspektyw lub reprezentujących je dyscyplin naukowych nie może rościć sobie prawa do wyłącznego reprezentowania problemów mechatroniki. Złożoność mechatroniki daje się ująć tylko za pomocą podejścia interdyscyplinarnego, które niejednorodne nici dyscyplinowych opisów i objaśnień połączy w jeden spójny sznur.

Zadanie takie wymaga teoretycznego potencjału integracyjnego. Bez niego praca interdyscyplinarna pozostaje tylko zwykłym zebraniem odrębnych przyczynków. Takim potencjałem wydaje się ROPOHLA systemowa teoria techniki. W całościowy sposób przedstawia ona istotę techniki z różnych perspektyw poznawczych. Czyni to przy tym w sposób bardzo przystępny, stawiając na pierwszym planie konkretny opis słowny i rysunkowy, a nie abstrakcyjny, często zniechęcający symboliczny opis teoriomnogościowy. Na podstawie tej teorii próbuję zbudować szkielet teorii techniki mechatronicznej, który ułatwiłby rozumienie, projektowanie i użytkowanie urządzeń mechatronicznych.

Najpierw ilustruję w drugim rozdziale podstawowe myśli książki za pomocą przykładu hamulca mechatronicznego. Przykład ten służy mi do konkretyzowania abstrakcyjnych pojęć i modeli systemowych urządzenia mechatronicznego. Następnie przedstawiam, w rozdziale trzecim, bliżej podstawę mojej systemowej analizy urządzenia mechatronicznego, czyli systemową teorię techniki. Systemowa teoria techniki nie zawiera żadnych założeń dotyczących jednej dyscypliny. Za jej pomocą można nie tylko opisać realnie istniejący stan techniki mechatronicznej, lecz również skonceptualizować nowe możliwości rozwiązań. Nie chodzi mi o to, aby opracować obszerną systemową teorię mechatroniki; szkic ten przedstawia jedynie pewne klocki do tego. Pokazuję raczej ramy koncepcjonalne, w których stawiam systemową teorię urządzenia mechatronicznego.

Ten formalny systemowy model techniki wypełniam treścią mechatroniczną w rozdziale czwartym. Mechatronika jest nazwą strukturalną, na pierwszy rzut oka mówiącą tyle, że jest to połączenie mechaniki z elektroniką. Ale to, do czego zdolne są takie struktury mechaniczno-elektroniczne wykracza daleko poza technikę. Techniki mechatronicznej nie można zrozumieć bez działań człowieka. Takie słowa, jak *działalność*, *działanie*, *praca*, występują jawnie bądź niejawnie w prawie każdej definicji techniki. Z fizykalnego punktu widzenia dzisiejsza technika staje się techniką mechatroniczną. Dlatego teoria działania niejako automatycznie nasuwa się jako materialna teoria dla interpretacji systemowego modelu mechatroniki. Konkretyzacji modelu РОПОНЛА na obszar mechatroniki dokonuję w dwóch etapach. Najpierw rozwijam ogólny model mechatronicznego systemu działaniowego, który konkretyzuję następnie empirycznie jako sztuczny system rzeczowy, czyli jako urządzenie mechatroniczne. Mechatroniczne systemy rzeczowe reprezentują sztuczne przedmioty, z mechanicznym przetwarzaniem materiału i energii i elektronicznym przetwarzaniem informacji, i są uchwytą rzeczywistością w czasie i przestrzeni. Nie wytwarzają żadnych własnych celów, ale w coraz większym zakresie ucieleśniają różne cele ludzkie, a ich funkcje zastępują coraz bardziej działania i czynności człowieka. Mechatroniczne systemy rzeczowe znajdują się w otoczeniu przyrodniczym, technicznym i społecznym. Jeżeli nowy mechatroniczny system rzeczowy zostanie umieszczony w otoczeniu społecznym, to wchodzi on przez to w przyrodę i społeczeństwo. Pokazuję równocześnie jak abstrakcyjny model systemowej teorii techniki można skonkretyzować dla opisu procesu uprzedmiotowienia działań człowieka.

W rozdziale piątym przedstawiam bliżej uwarunkowania towarzyszące powstawaniu mechatronicznych systemów rzeczowych, czyli urządzeń mechatronicznych. Zaczynam od ogólnej perspektywy historycznej rozwoju urządzeń mechatronicznych. Następnie konkretyzuję ją na dwóch konkretnych przykładach ewolucji mechatronicznej: rozwoju samochodu i rozwoju hamulca. Po tym wprowadzeniu historycznym definiuję pojęcie rozwoju mechatronicznego. Pokazuję, że od strony technicznej rozwój ten można opisać biologicznymi pojęciami ontogenezy i filogenezy, a od strony społecznej jako naturalny etap technizowania pracy człowieka. Następnie przechodzę do zagadnień projektowania mechatronicznego. Przedstawiam wymagania, jakie się dziś stawia urządzeniom mechatronicznym, ukazuję źródła i ograniczenia tych wymagań. Omawiam najbardziej charakterystyczne cechy projektowania mechatronicznego i jego modele. Czynię to na przykładzie modeli projektowania centralnego urządzenia mechatronicznego, czyli robota. Przedstawiam metody ogólnej inżynierii systemów dla rozwoju urządzenia mechatronicznego, modelowanie podstawowych rozwiązań z punktu widzenia mechaniki, automatyki, oprogramowania i elektroniki oraz zagadnienie projektowania elektronicznego w środowisku mechatronicznym. Na koniec rozdziału syntetycznie przedstawiam etapy projektowania mechatronicznego oraz pokazuję że projektowanie mechatroniczne z punktu widzenia systemowej teorii techniki można traktować jako systemem działaniowy.

Ostatni, szósty rozdział poświęcam aspektom użytkowania. Ponieważ z funkcjonalnego punktu widzenia urządzenie mechatroniczne staje się odpowiednikiem istoty

żywej, jego użytkowanie sprowadzam do zagadnienia zastępowalności człowieka przez mechatroniczne systemy rzeczowe. Czynię to z perspektywy antropologicznej, etycznej i kulturowo-filozoficznej. Służy temu dyskusja o „scenariuszach zastępowalności” z punktu widzenia filozofii antropologicznej. Przeciwwstawienie inteligencji człowieka inteligencji sztucznej prowadzi nas do wniosku, że w obecnych warunkach technicznych ludzka forma życia nie daje się sztucznie reprodukcować. Z zasadniczych powodów odrzucam wyobrażenie o zastępowalności człowieka. Z punktu widzenia etyki stosowanej prowadzi do to zakazu instrumentalizacji, który w sensie kantowskiego imperatywu kategorycznego chroni autonomię i godność osoby. Mając na uwadze odpowiedzialność za przyszłe generacje uznaję, że nieusprawiedliwione jest konstruowanie sztucznie inteligentnych systemów, które przeważają nad człowiekiem w sensie lub mierze pozwalającej na usunięcie człowieka jako formy życia. Ukazuję trzy rozumienia autonomii: techniczne, osobowe i idealistyczne. Z kulturowo-filozoficznego punktu widzenia pokazuję, że sztuczna inteligencja i mechatronika mogą tylko zyskać na pożegnaniu się ze scenariuszami zastępowalności człowieka i zamiast tego powinny zająć się konkretnymi projektami, w których centrum stać będzie przedłużenie i wspomaganie działań człowieka.

Jeśli wiemy, w jaki sposób technika przez urządzenia mechatroniczne jest w stanie wpływać na życie codzienne, to możemy to wpływanie uczynić czymś świadomym. Ten, kto chociażby pobieżnie wie jak funkcjonują mechatroniczne systemy działaniowe, kto zna funkcje i struktury urządzeń mechatronicznych, nie czuje się dalej bezsilny wobec władzy, którą się dotychczas posługiwał, nie pojmując jej. I kto zrozumie, że każdy rozwój techniczny wywodzi się z rozwoju człowieka, ten pomyśli o tym jak rozwój techniczny można kształtować z punktu widzenia człowieka i środowiska.

Mam nadzieję, że książką tą przyczyniłem się do głębszego zrozumienia mechatroniki. Chciałbym, żeby była to cegiełka, może to brzmi nieco patetycznie, do swego rodzaju oświecenia mechatronicznego. A oświecenie, jak się dobrze temu słowu przyjrzeć, jest czymś, co robimy, aby w przyszłości stało się zbyteczne.

8. Literatura

- van AMERONGEN J.: *The Role of Controls in Mechatronics*, in: *Mechatronics Handbook* (ed. BISHOP R.H), CRC Press 2002, chapter 21 pp. 1-17
- BERTRAM T.: *Eine Erfolgsgeschichte – von mechanischen zur mechatronischen Bremse*. 47. IWK, Technische Universität Ilmenau 2002, Tagungsband, S. 95-96
- BISHOP R. H., RAMASUBRAMANIAN M. K.: *What is Mechatronics*, in: *Mechatronics Handbook* (ed. BISHOP R.H), CRC Press 2002, chapter 1 pp. 1-10
- dtv-Brockhaus-Lexikon, Band 18. Wiesbaden, 1984
- van BRUSSEL J. A., SAS P., NÉMETH I., de FONSECA P., and van den BRAEMBUSCHE P.: Towards a Mechatronic Compiler *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol 6, no. 1, pp. 90-105, 2001
- BECKMANN J.: *Anleitung zur Technologie*. Wien, 1777
- Bosch Automotive Handbook, 5th ed. SAE, 2000
- BRANOWSKI B.: *Metody twórczego rozwiązywania problemów inżynierskich*. Wydawnictwo Wielkopolska Korporacja Techniczna NOT, Poznań 1999.
- 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
- CHRISTALLER T. et al.: *Robotik. Perspektiven für menschliches handeln i der zukunfftigen Gesellschaft*. Springer 2001
- CORVES B.: *Moderne Bewegungstechnik: mechanisch oder elektronisch*. Konstruktion 9-2002, S. 3
- CULSHAW, B.: Future Perspectives: Opportunities, Risks and Requirements in Adaptronics. In: *Adaptronics and smart structures* (ed. H. Janocha). Springer 1999
- DAENZER, W. F., HUBER F.: *Systems Engineering: Methodik und Praxis*, Verlag Industrielle Organisation, Zürich 1994
- DUECK, G.: *Omnisophie. Über richtige, wahre und natürliche Menschen*. Springer 2003
- EYTH M.: *Lebendige Kräfte*, Berlin 1905 (cytowanie za ROPOHL [1999])
- GAUSEMEIER J., RIEPE B., LÜCKEL J.: *Integrativer Maschinenbau – zu den produkten von Morgen*. Konstruktion 11/12-2000
- GAWRYSIAK M.: *Mechatronika i projektowanie mechatroniczne*. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1997
- GAWRYSIAK M.: *Edukacja metatechniczna. Wprowadzenie do celów i treści kształcenia ogólnotechnicznego*. Wydawnictwa Politechniki Radomskiej, Radom, 1998
- GIERGIEL M.J., HENDZEL Z., ŻYLSKI W.: *Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych*. PWN Warszawa, 2002
- GRABOWSKI H., RUDE S., POSCAI Z., HUANG M.: *Mechatronic Development Environment for Precision Engineering*. In: *Mechatronics 98*, J. Adolfsson and J. Karlsén (Editors), 1998 Elsevier Science Ltd, pp. 495-500
- GROTE G: *Autonomie und Kontrolle – zur gestaltung automatischer und risikoreicher Systeme*. Reihe Mensch-Technik-Organisation. Vdf Hochschulverlag, Zürich 1997
- GURAN A. (Editor), ANDERSON G. (Editor), TZOU H. (Editor): *Structronic Systems : Smart Structures, Devices and Systems : Materials and Structures* (Series on Stability, Vibration and Control of Systems. 1998. World Scientific Pub Co; ISBN: 9810229550
- HAGE H., HOFMANN D., LINSS G.: *Qualitätsverbesserungen durch e-documentation mit Rich Media Bedienungsanleitungen*. 47. IWK, Technische Universität Ilmenau 2002, Tagungsband, S. 411-412
- HAKEN H.: *Erfolgsgeheimnisse der Natur*. Stuttgart, DVA 1986

- HAKEN H.: *Are Synergetic Systems (Including Brains) Machines?*, in: Haken, H., Karlquist A., Svedin U. (eds.): *The Machine as Methaphor and Tool*. Springer, Berlin Heidelberg New York 1993, pp. 123-137
- HARMS H.-H.: *Mechatronik als neuer Denkansatz*. Konstruktion 7/8-2002, S. 3
- HEIMANN B., GERTH W., POPP K., *Mechatronika. Komponenty, metody, przykłady*, PWN, Warszawa, 2001 (przełożył M. GAWRYSIĄK)
- HEWIT J. R.: *Mechatronics design – The key to performance enhancement*. *Robotics and Autonomous Systems* 19 (1996) pp. 135-142
- ISERMANN R., *Mechatronische Systeme. Grundlagen*, Springer 1999
- von KEMPSKI J.: *Brechungen*, Reinbek 1964 (cytowanie za ROPOHL [1999])
- KALLMEYER F., GAUSEMEIER J.: *Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme*. Konstruktion 11/12-1999
- KOCH W., *Eine interaktive Entwurfsplattform für mechatronische Systeme auf der Basis von Komponentensoftware*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20, Nr. 320, Düsseldorf, VDI Verlag 2000
- KOPALIŃSKI W.: *Słownik wyrazów obcych*. Wiedza Powszechna. Warszawa, 1970
- KURZWEIL R.: *The Age of Spiritual Machines*. London, 1999
- MAIER M., MÜLLER K.: *ABS5.3: The New and Compact ABS5 Unit for Passenger Cars*. SAE Technical Paper Series 950757, 1995
- MORAVEC H.: *Robot. Mere machine to Transcendent Mind*. New York, 1999
- MROZEK Z.: *Komputerowo wspomagane projektowanie systemów mechatronicznych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Elektryczna i Komputerowa, nr 1, Kraków, 2002
- NATKE G.: *Spezialisierung ohne Isolation*. Unimazin Hannover, Ausgabe 1/2 2001, S. 30-33
- PAHL G., BEITZ W.: *Nauka konstruowania*. Warszawa, WNT, 1984
- PAHL G., BEITZ W., FELDHUSEN J., GROTE K.H.: *Konstruktionslehre*. Springer 2002
- RIEGER, U.: *Der System-Ingenieur als Leitfigur für ganzheitliche Lösungen*. Konstruktion 49 (1997), S. 21-25
- ROBERTSON A.: *4D Design; adding value to consumer products using mechatronics and multimedia*. In: *Mechatronics 98*, J. Adolfsson and J. Karlsén (Editors), 1998 Elsevier Science Ltd, pp. 507-512
- ROHATYŃSKI R.: *Przegląd modeli procesu projektowania*. W: XXI Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Ustroń 2003, T.1, s. 23-44. WNT, Warszawa, 2003
- ROPOHL, G.: *Eine Systemtheorie der Technik*. Hanser 1979
- ROPOHL, G.: *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. 2. Aufl. Hanser 1999
- Schemebuilder© Mechatronics*, in www.comp.lancs.ac.uk/edc/schemebuilder
- SCHOMBURG W. K.: *Mechatronik wird immer wichtiger*. Konstruktion 11/12-2002, S. 3
- STORNIER T.: *Beyond information – the natural history of intelligence*. Springer 1992.
- STURMA D.: *Robotik und menschliches Handeln*. In: CHRISTALLER T. et al.: *Robotik. Perspektiven für menschliches handeln i der zukunfftigen Gesellschaft*. Springer 2001, S. 111-134
- TESAR D.: *Where is the field of robotics going?* In: *Recent advances in mechatronics – 1999: proceedings of the international conference*, Istanbul, 1999 pp. 1-12
- TOEPPER S., LÜCKEL J., MORITZ W., KULBUSH W., SCHARFELD F.: *Parallelroboter Triplanar – Design eines mechatronischen Produkts*. Konstruktion 11/12-2002, S. 59-60
- UHL T. (ed): *Wybrane problemy projektowania mechatronicznego*. Wydawnictwo Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn, AGH, Kraków, 1999
- VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf, VDI-Verlag 2002
- WALTERS R. M., BRADLEY D. A., DOREY A. P.: *A Computer Based Tool to support Electronic Design in a Mechatronic Environment*. In: *Mechatronics 98*, J. Adolfsson and J. Karlsén (Editors), 1998 Elsevier Science Ltd, pp. 541-546

WARNECKE H.-J., SCHRAFT R.D. HÄGELE M., BARTH O., SCHMIERER G.: *Manipulator design*, chapter 5 in *Handbook of Industrial Robotics*, Second Edition, Edited by Shimon Y. Nof, 1999 John Wiley & Sons, Inc.

WARNECKE H.-J.: *Rewolucja kultury przedsiębiorstwa. Przedsiębiorstwo fraktalne*. PWN. Warszawa, 1999 (przełożył M. GAWRYSIAK)

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.

WIKANDER J., TÖRNGREN M.: *Mechatronics as an engineering science*. In: Mechatronics 98, J. Adolfsson and J. Karlsén (Editors), 1998 Elsevier Science Ltd, pp. 651-56

van ZANTEN A., ERHARDT R., PFAFF G.: *VDC, The Vehicle Dynamics Control System of Bosch*. SAE Technical Paper Series 950759, 1995