

**Automatyzacja  
i robotyzacja  
procesów  
produkcyjnych**

**Automatyzacja  
i robotyzacja  
procesów  
produkcyjnych**



ZARZĄDZANIE  
I INŻYNIERIA  
PRODUKCJI

Gabriel Kost  
Piotr Łebkowski  
Łukasz N. Węsierski

# Automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych



---

Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne

Autorzy rozdziałów

**Gabriel Kost:** 2, 3, 8; 6.2–6.6, 7.2, 7.5, 9.2–9.3; pytania kontrolne do rozdziałów 2, 3, 6, 9

**Piotr Łebkowski:** wstęp; 1, 8; 6.1, 6.7, 7.1–7.4, 9.1; pytania kontrolne do rozdziałów 5, 6, 7; przykłady w rozdziale 5

**Łukasz N. Węsierski:** 4, 5, 8; 9.1; pytania kontrolne do rozdziałów 4, 8; przykłady w rozdziale 5

Recenzent

**Prof. dr hab. inż. Tomasz Koch**

Projekt okładki

**Paweł Rosolek**

Redaktor

**Anna Obrycka**

© Copyright by Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A.

Warszawa 2018

ISBN 978-83-208-2336-3

Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A.

ul. Podwale 17 lok. 2, 00-252 Warszawa

tel. +48 22 826 41 82

e-mail: [pwe@pwe.com.pl](mailto:pwe@pwe.com.pl)

[www.pwe.com.pl](http://www.pwe.com.pl)

Skład i łamanie: EGRAF, Warszawa

# Spis treści

<b>Wstęp</b> .....	9
<b>Rozdział 1. Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych</b> .....	13
1.1. Proces produkcyjny .....	13
1.2. Definicje podstawowych pojęć .....	15
1.3. Zakres automatyzacji i robotyzacji .....	16
1.4. Stopień automatyzacji i podatność procesu na automatyzację .....	19
1.5. Rozwój automatyzacji .....	21
1.6. Systemy wytwórcze jako systemy mechatroniczne .....	23
Pytania kontrolne .....	25
<b>Rozdział 2. Struktura funkcjonalna sterowania numerycznego i automatycznej regulacji</b> .....	26
2.1. Proces produkcyjny a sposób sterowania maszynami, robotami i złożonymi strukturami technologicznymi .....	26
2.2. Struktura układu sterowania automatycznego: układ otwarty i układ zamknięty .....	30
2.3. Podstawy sterowania cyfrowego .....	34
2.3.1. Wprowadzenie .....	34
2.3.2. Sterowanie cyfrowe: struktura blokowa, pętle sprzężenia zwrotnego w układach .....	39
2.3.3. Obrabiarkowe i robotowe sterowanie typu NC, CNC i bezpośrednie DNC .....	44
2.3.4. Sterowanie numeryczne obrabiarkowe: punktowe, odcinkowe i ciągłe .....	45
2.3.5. Sterowanie numeryczne robotowe: punktowe PTP i ciągłe CP .....	48
2.3.6. Klasyfikacja układów sterujących .....	50
2.3.7. Układy automatycznego nadzoru i diagnostyki .....	55

2.4. Proces produkcyjny jako obiekt regulacji . . . . .	56
2.4.1. Obiekt regulacji i jego otoczenie . . . . .	56
2.4.2. Złożoność systemowa procesu przemysłowego i jego struktura hierarchiczna . . . . .	58
Pytania kontrolne . . . . .	62
<b>Rozdział 3. Sygnały w ciągłych i dyskretnych układach automatyki . . . . .</b>	<b>63</b>
3.1. Obserwowalność systemu technologicznego — dyskretność i ciągłość procesu technologicznego . . . . .	63
3.2. Sygnał jako podstawowy nośnik informacji w układach sterowania . . . . .	67
3.3. Transmisja informacji w układach automatycznego sterowania procesami technologicznymi . . . . .	76
3.3.1. Położenie jako wartość zadana układu sterowania . . . . .	76
3.3.2. Tworzenie informacji o położeniu . . . . .	82
3.3.3. Regulacja położenia i jego wielkości charakterystyczne — serwonapędy maszyn i robotów . . . . .	89
3.3.4. Źródła sygnałów w układach sterowania i regulacji — czujniki i diagnostyka procesu . . . . .	93
Pytania kontrolne . . . . .	99
<b>Rozdział 4. Techniczne możliwości systemów automatyzacji . . . . .</b>	<b>101</b>
4.1. Techniczna realizacja napędu i sterowania układów automatyzacji procesów produkcyjnych . . . . .	101
4.2. Elementy napędowe maszyn technologicznych i manipulacyjnych . . . . .	109
4.2.1. Elementy elektryczne . . . . .	109
4.2.2. Elementy pneumatyczne . . . . .	114
4.2.3. Elementy hydrauliczne . . . . .	117
4.3. Elementy przetwarzania informacji i elementy sterujące . . . . .	119
4.4. Pneumatyczne i hydrauliczne zespoły zasilania . . . . .	124
4.5. Charakterystyka napędów, możliwości i zakres ich stosowania . . . . .	132
Pytania kontrolne . . . . .	139
<b>Rozdział 5. Struktura i funkcje zautomatyzowanych systemów produkcyjnych . . . . .</b>	<b>141</b>
5.1. Struktura układu sterowania . . . . .	141
5.2. Podstawy projektowania układów automatyzujących procesy produkcyjne . . . . .	143
5.3. Podstawy układów cyfrowych . . . . .	147
5.3.1. Algebra dwuwartościowa . . . . .	147
5.3.2. Funkcje przełączające . . . . .	149
5.3.3. Metody minimalizacji funkcji przełączających . . . . .	153
5.3.4. Sposoby realizacji funkcji przełączających . . . . .	159

5.4. Struktura układów automatyzujących . . . . .	162
5.4.1. Klasyfikacja układów . . . . .	162
5.4.2. Układy kombinacyjne i sekwencyjne . . . . .	163
5.4.3. Synteza blokowa . . . . .	166
5.5. Synteza układu cyfrowego . . . . .	167
5.5.1. Synteza abstrakcyjna układu cyfrowego . . . . .	167
5.5.2. Synteza strukturalna . . . . .	170
5.5.3. Synteza techniczna . . . . .	175
5.6. Realizacja sterowania z zastosowaniem sterowników PLC . . . . .	179
5.6.1. Podział i budowa sterowników PLC . . . . .	179
5.6.2. Rodzaje i zadania modułów sprzętowych . . . . .	181
5.6.3. Realizacja programu i dobór sterownika . . . . .	182
5.7. Algorytmizacja procesów — modelowanie . . . . .	183
5.7.1. Algorytm procesu . . . . .	184
5.7.2. Modelowanie procedur sterowania dyskretnych procesów przemysłowych . . . . .	184
5.8. Podstawy programowania sterowników PLC . . . . .	189
5.8.1. Języki programowania . . . . .	189
5.8.2. Struktura języka programowania . . . . .	190
5.8.3. Instrukcje, rozkazy i zmienne języka programowania . . . . .	192
5.8.4. Programowanie zależności funkcyjnych . . . . .	194
Pytania kontrolne . . . . .	208
<b>Rozdział 6. Typowe układy automatycznego systemu wytwórczego . . . . .</b>	<b>209</b>
6.1. Podsystem maszyn i urządzeń . . . . .	210
6.1.1. Urządzenia obróbcze . . . . .	210
6.1.2. Zespoły i podsystemy nowoczesnego centrum frezarskiego CNC . . . . .	213
6.2. Podsystemy transportu . . . . .	226
6.2.1. Rodzaje systemów transportowych przystanowiskowych (obrobarkowych) i wydziałowych . . . . .	227
6.2.2. Środki transportowe . . . . .	231
6.2.3. Pozycjonery . . . . .	233
6.3. Podsystem magazynowania . . . . .	234
6.3.1. Wprowadzenie . . . . .	234
6.3.2. Magazyny narzędzi, wyrobów i surowców . . . . .	237
6.3.3. Systemy magazynowe (stanowiskowe, wydziałowe) i magazynowe środki transportowe . . . . .	239
6.4. Podsystem manipulacji i orientowania . . . . .	241
6.4.1. Wprowadzenie . . . . .	241
6.4.2. Zmieniające palety i narzędzi . . . . .	242
6.4.3. Manipulatory i roboty przemysłowe . . . . .	244
6.5. Podsystem mocowania i wykonawczy . . . . .	246

6.6. Podsystem kontroli i diagnostyki . . . . .	249
6.7. Podsystem sterowania . . . . .	254
Pytania kontrolne . . . . .	259
<b>Rozdział 7. Elastyczność systemów automatycznych . . . . .</b>	<b>261</b>
7.1. Elastyczność w systemach produkcyjnych . . . . .	261
7.1.1. Pojęcie i elementy elastycznego systemu produkcyjnego . . . . .	261
7.1.2. Elastyczny moduł produkcyjny . . . . .	264
7.1.3. Elastyczne gniazdo produkcyjne . . . . .	265
7.1.4. Elastyczna linia produkcyjna . . . . .	267
7.1.5. Elastyczne sieci produkcyjne . . . . .	268
7.1.6. Elastyczne systemy montażowe . . . . .	271
7.2. Rodzaje elastyczności . . . . .	273
7.2.1. Elastyczność technologiczna . . . . .	274
7.2.2. Elastyczność organizacyjna . . . . .	275
7.2.3. Elastyczność produkcyjna . . . . .	276
7.3. Wybór stopnia automatyzacji i robotyzacji . . . . .	277
7.4. System planowania i sterowania w elastycznych systemach produkcyjnych . . . . .	279
7.4.1. Hierarchiczny system planowania i sterowania produkcją . . . . .	279
7.4.2. Rozproszony system sterowania produkcją . . . . .	281
7.5. Niezawodność i eksploatacja systemów automatycznych i zrobotyzowanych . . . . .	284
Pytania kontrolne . . . . .	288
<b>Rozdział 8. Efekty oraz skutki automatyzacji i robotyzacji . . . . .</b>	<b>289</b>
8.1. Skutki organizacyjne . . . . .	290
8.2. Skutki społeczne . . . . .	291
8.3. Skutki ekonomiczne . . . . .	292
Pytania kontrolne . . . . .	294
<b>Rozdział 9. Nowe tendencje w automatyzacji i robotyzacji procesów technologicznych . . . . .</b>	<b>295</b>
9.1. Przyszłość elementów oraz zespołów wykonawczych, pomiarowych i sterujących . . . . .	295
9.2. Zaawansowane algorytmy sterowania . . . . .	297
9.3. Sieci przemysłowe sygnałowe i informatyczne . . . . .	303
Pytania kontrolne . . . . .	311
<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>313</b>
<b>Indeks . . . . .</b>	<b>317</b>



# Wstęp

Dynamiczny rozwój techniki komputerowej oraz szybki postęp w zakresie technologii wytwarzania doprowadziły w ostatnim trzydziestoleciu do szerokiego zastosowania w przemyśle obrabiarek sterowanych numerycznie i robotów przemysłowych oraz zautomatyzowanych systemów transportu i magazynowania. Przede wszystkim jednak rozwój ten przyczynił się do niezwykle intensywnego wykorzystania systemów komputerowych w planowaniu i sterowaniu produkcją. Wymagania współczesnego rynku, cechującego się zapotrzebowaniem na coraz większą liczbę różnych typów i wersji wyrobów, przy niezbędnym w takiej sytuacji znacznym skróceniu serii identycznych produktów oraz szybszej wymianie tych produktów na lepsze, nowocześniejsze, modniejsze, wymusiły powstanie nowych koncepcji zautomatyzowanych systemów produkcyjnych. Dąży się w nich do osiągnięcia pełnej integracji wszystkich działań związanych z funkcjonowaniem nowoczesnego przedsiębiorstwa produkcyjnego.

Produkcja komputerowo zintegrowana, elastyczny system produkcyjny to terminy, które dotyczą coraz większej liczby zakładów produkcyjnych w wielu krajach świata, także w Polsce. Komputerowo zintegrowane podejście i zastosowanie metod zwiększających elastyczność procesów są szczególnie pożądane, bowiem 75% ogólnoswiatowej produkcji wytwarzane jest w małych i średnich seriach produkcyjnych. Warunkiem koniecznym tej integracji są: pełna automatyzacja i robotyzacja procesów wytwórczych. Automatyzacja i robotyzacja procesów wytwórczych oraz usługowych to podstawa nowoczesnej gospodarki.

Autorzy zdają sobie sprawę z tego, jak trudne jest przekazanie ogromu wiedzy z zakresu automatyzacji i robotyzacji procesów produkcyjnych. Specjalistyczne piśmiennictwo obejmuje tysiące książek, artykułów i raportów naukowych. Automatyzacja i robotyka jest oddzielną dyscypliną w dziedzinie nauk technicznych, która korzysta z najnowszych osiągnięć wszystkich dziedzin nauki i techniki. Nie jest możliwe, aby pojedyncza osoba zaprojektowała złożony system, aby pojedyncza osoba była uniwersalnym specjalistą. Projektowanie procesu, samo wytwarzanie oraz sterowanie tym procesem wymagają ekspertów, którzy pracują w sposób zespołowy, interdyscyplinarny. Ekspert musi nie tylko być znawcą wąskiego

zagadnienia, ale także mieć zdolności porozumiewania się z innymi specjalistami. Jego wiedza ogólna umożliwi mu wyjście poza wąskie zespoły na rzecz zespołów, w których prace mogą przebiegać współbieżnie. Dzięki temu ma miejsce działanie synergiczne, co oznacza, że łączny efekt działania zespołu specjalistów jest większy od sumy efektów ich działania oddzielnego.

Podręcznik ten umożliwi zapoznanie się z problemami współczesnej, elastycznej automatyzacji. Ambicją autorów nie jest przedstawienie zbioru wąskich zagadnień specjalistycznej wiedzy, lecz zaprezentowanie ogólnych tendencji panujących we współczesnej automatyzacji i robotyzacji procesów wytwórczych. Całość materiału prezentowanego w podręczniku podzielono na 9 rozdziałów.

W **rozdziale 1** zdefiniowano podstawowe pojęcia związane z automatyzacją procesu produkcyjnego. Stanowi on wprowadzenie do zagadnień robotyzacji. Omówiono pojęcia maszyny manipulacyjnej i robota oraz określono warunki, jakie muszą być spełnione, aby można było zrobotyzować proces produkcyjny. Opisano mechatroniczne podejście do projektowania układów automatyzujących procesy produkcyjne, które dzięki odpowiedniemu doborowi i integracji elementów mechanicznych, sensorowych i elektronicznych pozwala uzyskać najlepszy efekt synergii.

Jednym z istotnych czynników pozwalających na uzyskanie pożądaných efektów jest zastosowanie w szerokim zakresie metod i technik sterowania automatycznego. W **rozdziale 2** omówiono proces technologiczny jako obiekt sterowania oraz jego otoczenie, które ma istotny wpływ na rodzaj zastosowanych układów sterowania. Przedstawiono zagadnienie sterowania ręcznego związanego z konwencjonalnymi procesami technologicznymi oraz zagadnienie sterowania automatycznego, ze szczególnym uwzględnieniem procesu regulacji automatycznej. Omówione zostały pojęcia regulatora, sprzężenia zwrotnego i uchybu oraz przepływu informacji w układzie regulacji. Zaprezentowano podstawową strukturę układu sterowania numerycznego i jego elementy ważne ze względu na wyspecjalizowane zadania związane z oddziaływaniem na proces wytwarzania. Przedstawione zostały algorytmy sterowania numerycznego stosowane w zautomatyzowanych maszynach technologicznych i robotach oraz urządzeniach pomocniczych.

**Rozdział 3** poświęcono podstawowym zagadnieniom związanym z procesem automatycznego sterowania, takim jak tworzenie i transmisja sygnałów informacyjnych w układach cyfrowej regulacji. Omówione zostały rodzaje sygnałów i ich charakterystyki oraz regulacja położenia punktu charakterystycznego sterowania maszyny i robota. Przedstawiono podstawowe układy regulacji nadążnej, stałowartościowej i programowej.

W **rozdziale 4** podjęto zagadnienie technicznej realizacji zautomatyzowanych systemów produkcyjnych. Opisano możliwości realizacji układów automatyki przy zastosowaniu elementów elektrycznych, hydraulicznych i pneumatycznych. Przedstawiono przegląd elementów roboczych, omówiono układy formowania sygnału oraz układy sterowania półautomatycznego. Ponadto zaprezentowano układy sterowania automatycznego i układy programowe.

Główny element **rozdziału 5** stanowią podstawy projektowania układów cyfrowych automatyzujących procesy produkcyjne. Po zaprezentowaniu struktury układów sterowania cyfrowego opisano ogólny algorytm ich projektowania. Omówiono funkcje logiczne, sposoby ich przedstawiania, metody minimalizacji i realizacji tych funkcji za pomocą różnych elementów. Dalej przedstawiono algorytmy projektowania układów kombinacyjnych i sekwencyjnych, poczynając od syntezy blokowej, przez syntezę abstrakcyjną, syntezę strukturalną oraz realizację hardwarem i oprogramowaniem układu sterowania, aż do syntezy technicznej. Kolejny fragment rozdziału dotyczy zagadnień związanych z oprogramowaniem realizacji układów sterowania z zastosowaniem sterowników PLC. Dokonano podziału sterowników i opisano ich budowę. Następnie przedstawiono istotę wybranych języków programowania. Omówiono podstawowe instrukcje, rozkazy i zmienne języka, sposoby programowania funkcji logicznych i uzależnień czasowych, funkcje licznikowe, porównania oraz funkcje dodatkowe. Na końcu rozdziału zaprezentowano elementy algorytmiki i przykłady modelowania procesów produkcyjnych.

W **rozdziale 6** omówiono podstawowe zautomatyzowane elementy systemu wytwarzania. Przedstawiono przykładowe maszyny i urządzenia technologiczne oraz podano ich najważniejsze charakterystyki. Opisano typowe obrabiarki sterowane numerycznie, centra obróbcze CNC, maszyny pomiarowe i roboty przemysłowe. Zaprezentowano przykłady układów pomiarowych, manipulacyjnych i montażowych. W dalszej części rozdziału omówione zostały elementy struktury transportowo-magazynowej.

Elastyczne systemy produkcyjne należą do klasy zautomatyzowanych systemów wytwórczych łączących najnowsze koncepcje i osiągnięcia współczesnej nauki oraz technologii. W **rozdziale 7** przedstawiono ogólną konfigurację tych systemów, a także dokonano ich klasyfikacji ze względu na liczbę i rodzaj maszyn, ich przeznaczenie i rozmieszczenie przestrzenne. Zaprezentowane zostały zagadnienia dotyczące rodzajów elastyczności jako składowych elastyczności ogólnej systemu technologicznego. Podano typowe przykłady elastycznych systemów wytwórczych. Elastyczne systemy należą do najbardziej kosztownych obiektów przemysłowych i dlatego niezwykle istotne jest optymalne wykorzystanie wszystkich możliwości, jakie stwarza ich potencjał wytwórczy. W rozdziale przedstawiono wielopoziomową strukturę decyzyjną — system planowania i sterowania produkcji oraz jego trzy główne poziomy: planowanie strategiczne, planowanie taktyczne i sterowanie operacyjne. W końcowej części rozdziału 7 omówione zostały podstawowe aspekty zagadnienia niezawodności na przykładzie robotyki: pojęcie niezawodności i jej modele. Niezawodność systemu zrobotyzowanego opisano jako wypadkową niezawodności jego poszczególnych składników.

Elastyczne systemy wytwarzania, które charakteryzuje bardzo wysoki poziom integracji i automatyzacji procesu, są zdolne reagować bez opóźnień na zmienne żądania rynku, wydajnie produkując różne wyroby w krótkich seriach. W **rozdziale 8** omówiono efekty elastycznej automatyzacji, m.in. skrócenie czasu realizacji partii produkcyjnej, skrócenie czasu koniecznego do zmiany asortymentu

produkcji, zminimalizowanie wielkości produkcji w toku. Przedstawiono także ograniczenia w stosowaniu elastycznych systemów wytwarzania. Ponadto zaprezentowane zostały zagadnienia związane z konsekwencjami wprowadzania w szerokim zakresie robotów przemysłowych do produkcji. Omówiono składniki kosztów związanych z reorganizacją struktury technologicznej wydziału i koniecznością przebudowy infrastruktury informacyjnej zakładu, kształtujące poziom integracji informacyjnej przedsiębiorstwa, a także koszty społeczne i ekonomiczne.

W **rozdziale 9** przedstawione zostały nowe tendencje rozwojowe systemów elastycznej automatyzacji procesów wytwarzania. Omówiono zagadnienia nowych elementów wykonawczych, pomiarowych, zespołów sterujących. Wskazano na istotę nowoczesnego wytwarzania, jakim jest pełne zintegrowanie wszystkich procesów składowych, a także opisano informatyczne sieci przemysłowe. Zaprezentowano rozwiązania oparte na sieciach sygnałowych i zorientowane problemowo standardy informatycznych sieci przemysłowych czasu rzeczywistego, które pozwalają na poszerzenie procesu integracji środowiska technologicznego z otoczeniem technologiczno-organizacyjnym przedsiębiorstwa w zakresie diagnozowania, zarządzania i sterowania produkcją.

Autorzy podręcznika dziękują firmom Festo, Univer i innym za udostępnienie materiałów ilustracyjnych opisywanych urządzeń.

*Autorzy*

# Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych

## 1.1. Proces produkcyjny

Produkcja — najkrócej mówiąc — to proces przekształcania zasobów w dobra. J. Honczarenko [Honczarenko 2008, 2009] pisze: „produkcja to zespół skoordynowanych procesów pracy, w których świadoma i celowa działalność ludzka, czyli praca, służy zarówno do opanowania sił przyrody, jak też ich przetworzenia w dobra materialne (wyroby przemysłowe, usługi materialne) lub w inne formy (np. postać informacyjną) w celu zaspokojenia określonych potrzeb ludzkich.

Systemem produkcyjnym (przemysłowy, przetwórczy) nazywa się statyczną i dynamiczną kombinację zasobów ludzkich, fizycznych i finansowych, przetwarzających zasilenia wejściowe (pracę ludzi, przedmioty pracy, środki pracy i informację) w stany wyjściowe, wyrażone w postaci materialnej (wyroby przemysłowe, usługi materialne) lub informacyjne”.

Proces produkcyjny składa się z działań, które prowadzą do wytworzenia (z materiałów, półfabrykatów, części maszyn i ich zespołów) gotowych wyrobów. Podstawową częścią procesu produkcyjnego jest proces technologiczny. Jego celem jest uzyskanie żądanych kształtów, wymiarów i właściwości przedmiotu pracy albo dokonanie wzajemnych połączeń elementów maszyn lub zespołów w wyrobie.

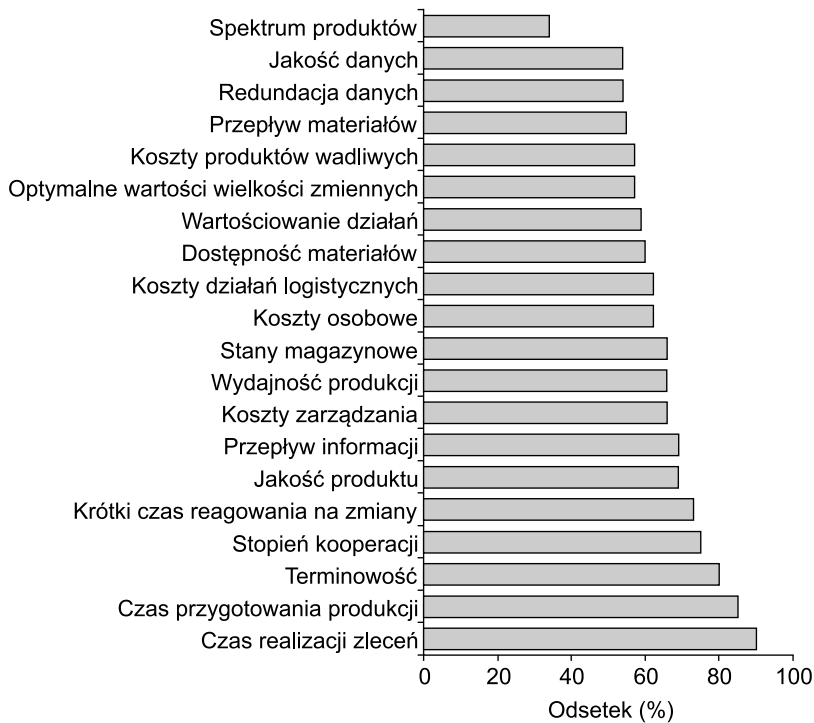
„Ta część procesu produkcyjnego, w której następuje przetwarzanie surowców i półfabrykatów na przedmioty materialne i jest ono prowadzone przy zastosowaniu środków technologicznych i odpowiednich metod, nazywana jest wytwarzaniem. Systemem wytwarzania nazywa się system maszyn o różnym przeznaczeniu technologicznym, a więc realizujące różne metody wytwarzania” [Honczarenko 2008, 2009].

Systemy wytwarzania ostatnich 30 lat muszą sprostać coraz ostrzejszym wymaganiom rynkowym. Główne cechy konkurencyjności produkcji to: znaczny wzrost jakości produktu i wariantowości produktów przy zwiększeniu ich dostępności oraz różnorodności produktów, wzrost bezpośredniego udziału klienta w procesie kształtowania wyrobu, skrócenie cyklu życia produktu. Nowoczesną pro-

dukcję cechuje skrócenie cyklu produkcyjnego, zmniejszenie wielkości partii produkcyjnej, zwiększenie stopnia kooperacji, zmniejszenie poziomu zapasów zarówno produktów gotowych, jak i materiałów oraz półwyrobów, zwiększenie liczby cykli obrotu parytetem zapasów, zmniejszenie kosztów produkcji. Zapewnienie powtarzalności dokładnych parametrów procesu wytwórczego, osiągnięcie odpowiedniej dynamiki przebiegu tego procesu przy równoczesnym uwzględnieniu skutków wszystkich zakłóceń wymaga wyręczenia człowieka zarówno w procesach czysto fizycznych — mechanicznych, jak i wielu procesach intelektualnych — decyzyjnych.

Priorytety działań konkurencyjnego przedsiębiorstwa zaprezentowano na rysunku 1.1.

**Rysunek 1.1. Priorytety działań konkurencyjnego przedsiębiorstwa**



Źródło: [Chlebus 2000].

W konkurencyjnym przedsiębiorstwie jednym z najistotniejszych działań o charakterze strategicznym jest dążenie do skrócenia cyklu rozwoju produktu we wszystkich fazach jego powstawania. Można przytoczyć badania przeprowadzone w niemieckich firmach produkcyjnych, które dotyczyły analizy priorytetowych czynników wpływających na działalność przedsiębiorstwa [Chlebus 2000]. Czas realizacji zlecenia, czas przygotowania produkcji, terminowość, stopień kooperacji i krótki czas reagowania na zmiany zapotrzebowania to czynniki, na które wska-

zywało 75–90% menedżerów. Pozostałe czynniki także mają duże znaczenie. Na jakość produktu, przepływ informacji, koszty zarządzania, wydajność produkcji i stany magazynowe szczególną uwagę zwróciło 65–75% kadry zarządzającej. Niewiele mniejsze znaczenie (55–65%) przypisano innym 9 czynnikom, w tym: kosztom osobowym, kosztom działań logistycznych, dostępności materiałów, wartościowaniu działań czy jakości danych.

Konieczność sprostania tym wymaganiom wymusza stosowanie działań, które mają na celu automatyzację wszystkich faz rozwoju produktu. Można to osiągnąć poprzez zwiększenie stopnia automatyzacji i robotyzacji oraz elastyczności produkcji, wprowadzenie produkcji innowacyjnej. Niezbędna staje się przy tym komputerowa integracja wszystkich procesów: tych obejmujących organizacyjne planowanie produkcji i sterowanie nią, a także planowanie i sterowanie techniczne. Rozwinęło się wiele strategii wytwarzania. Każda konkretna strategia procesów produkcyjnych ma sens jedynie wówczas, gdy jest uzasadniona ekonomicznie.

Automatyzacja i robotyzacja procesów jest warunkiem koniecznym nowoczesnej produkcji. Prowadzi do rozszerzenia możliwości człowieka i zwiększenia efektywności jego pracy.

## 1.2. Definicje podstawowych pojęć

**Mechanizm** to układ elementów (ciał), który przeznaczony jest do przekształcenia ruchu jednego ciała (ciał) oraz sił przyłożonych do niego w oczekiwany ruch innych ciał oraz sił ich oddziaływań. **Mechanizacja** to zastępowanie pracy fizycznej człowieka przez pracę maszyn lub urządzeń.

**Automatyzacja** polega na stosowaniu urządzeń, które przejmują od człowieka działania poznawcze, intelektualne i decyzyjne. Urządzenia te spełniają funkcje:

- pomiarową i rejestracyjną,
- przetwarzania informacji (gromadzenie informacji w bazach danych, wyznaczanie modeli matematycznych zjawisk i obiektów, wnioskowanie, wypracowanie najlepszych decyzji o oddziaływaniu na obiekt),
- sterowania (realizacja decyzji o sposobie oddziaływania na obiekt, bezpośrednie oddziaływanie urządzeń na obiekt).

Można uogólnić, że automatyzacja to połączenie czterech istotnych elementów i cech:

- 1) platformy wykonawczej, do której zaliczyć należy: maszyny (np. obrabiarki, stacje montażowe, maszyny czyszczące), urządzenia (np. magazyn narzędzi i automatyczny zmieniacz narzędzi), narzędzia, przyrządy (np. urządzenia pomiarowe), systemy (np. ERP — system planowania zasobów przedsiębiorstwa), hipersystemy (np. Internet),
- 2) procesu, na który składają się: ruchy, operacje i realizowane funkcje,

- 3) autonomiczności w działaniu wyrażonej w niezależnej strukturze organizacyjnej, procesie sterowania, automatycznej kontroli, sztucznej inteligencji oraz możliwości współpracy z innymi systemami,
- 4) źródeł energii.

**Automat** to maszyna (mechanizm), która wykonuje sekwencję czynności bez udziału człowieka. Szczególnie ważną kategorię automatów stanowi tzw. automat cyfrowy, czyli układ przełączający. Wejściowy sygnał cyfrowy, binarny zostaje przetworzony na odpowiedni binarny sygnał wyjściowy. Sposób przetworzenia sygnałów determinuje typ automatu: bez pamięci — automat kombinacyjny, w którym wyjście jest uzależnione jedynie od obecnego stanu wejścia, oraz automat z pamięcią — sekwencyjny, w którym wyjście zależy także od stanu wewnętrznego automatu (od sekwencji podanych na wejściu sygnałów).

**Manipulator**, maszyna manipulacyjna, to urządzenie do chwytania i kierowania przedmiotów. Stanowi zwykle część robota.

**Robot** jest maszyną lokomocyjno-manipulacyjną, która służy do realizacji lub wspomagania czynności energetyczno-ruchowych, sensualnych i intelektualnych człowieka.

**Robotyzacja** polega na wprowadzeniu do procesu wytwórczego robotów, manipulatorów i urządzeń pomocniczych, które realizują operacje z ograniczonym udziałem człowieka lub bez jego udziału.

### 1.3. Zakres automatyzacji i robotyzacji

Odpowiedź na pytanie, dlaczego i co automatyzować, wydaje się oczywista. Automatyzuje się proces, aby stał się bardziej opłacalny. Można dostrzec wiele szczegółowych powodów, które decydują o konieczności automatyzacji procesów.

- Ograniczone możliwości wykonawcze i percepcyjne człowieka. Człowiek nie jest w stanie wykonać wielu operacji i działań z powodu ich skali, np. proces przebiega zbyt szybko, mikroczęści są zbyt małe, liczba danych jest zbyt duża do ich zapamiętania i przetwarzania. Wiele zjawisk, np. postrzeganie pewnych rodzajów energii, leży poza możliwościami człowieka.
- Wydajność procesu. Komputery, urządzenia przemysłowe, maszyny transportowe i inne wyposażenie powinny pracować z taką wydajnością, która nie jest możliwa bez automatyzacji i robotyzacji, np. sterowanie procesami chemicznymi, sterowanie procesami produkcji żywności, przeprowadzanie testów medycznych, optymalizacja obrazów cyfrowych. Automatyzacja jest niezbędna, jeżeli proces przebiega w stanach dalekich od optymalnych. Spełnia funkcje kontrolne, steruje procesem.
- Bezpieczeństwo. Układy automatyki mogą pracować w środowiskach niebezpiecznych dla człowieka: ekstremalnych temperaturach, agresywnych gazach,

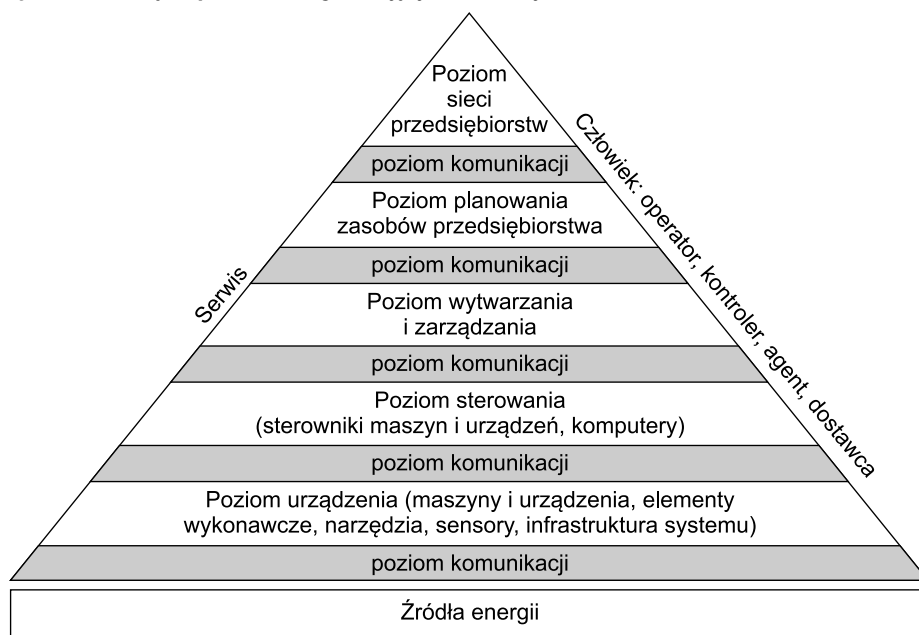


promieniowaniu radioaktywnym. Są niezastąpione przy sterowaniu w sytuacjach awaryjnych, także ze względu na szybkość reagowania na sygnał.

- Jakość wyrobów. Dokładność wykonania, jakość produktu gotowego, jakość serwisu, powtarzalność tych cech są charakterystyczne dla zautomatyzowanego wytwarzania.
- Względy ekonomiczne. Automatyzacja może znacznie obniżyć koszty prac wykonywanych bez jej użycia. Zapewnia oszczędności czasu pracy, bezpieczeństwo i obniża koszt utrzymania, staje się niezbędna przy braku siły roboczej. Procesy i usługi oparte na automatyzacji oraz na wiedzy zmniejszają zapotrzebowanie na pracowników średniego szczebla, czego efektem są zmniejszenie kosztów utrzymania przedsiębiorstwa i eliminacja utrudnień biurokratycznych. Przykłady: zdalny nadzór, zdalne sterowanie, bezpośrednie połączenie między menedżerem przedsiębiorstwa a operatorem linii lub gniazda produkcyjnego, oparty na Internecie serwis finansowy lub serwis biur podróży.
- Dostępność. Współczesny automat staje się coraz bardziej dostępny i przyjazny dla użytkownika, także dla ludzi niepełnosprawnych. Dzieje się to dzięki zastosowaniu interfejsów rozpoznawania obrazu i głosu.

Niezależnie od dziedzin, w których zastosowano systemy automatyczne, ich struktura organizacyjna jest podobna. Można wyróżnić 5 charakterystycznych poziomów: 1) poziom urządzenia (maszyny i urządzenia, elementy wykonawcze, narzędzia,

**Rysunek 1.2. Trójkąt poziomów organizacyjnych automatyki**

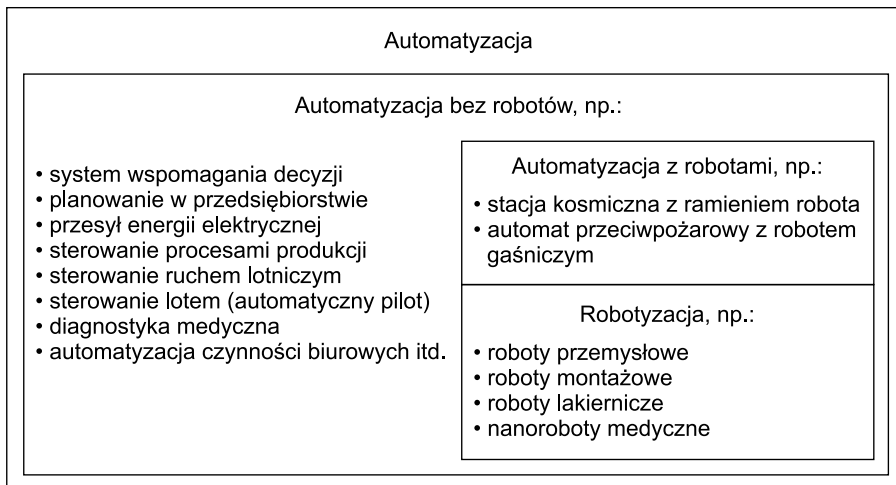


Źródło: [Nof 2009].

sensory, infrastruktura systemu), 2) poziom sterowania (sterowniki maszyn i urządzeń, komputery), 3) poziom wytwarzania i zarządzania, 4) poziom planowania zasobów przedsiębiorstwa (ERP), 5) poziom sieci przedsiębiorstw (rysunek 1.2).

Robotyzacja jest bardzo ważnym fragmentem ogólnie rozumianej automatyzacji. Niekiedy wyróżnia się: automatyzację bez stosowania robotów, automatyzację, w której wykorzystuje się roboty, oraz robotyzację (rysunek 1.3).

**Rysunek 1.3. Podział systemów automatycznych ze względu na stosowanie robotów**



Automatyzacja, w której nie stosuje się robotów, obejmuje m.in.:

- automaty i zautomatyzowane maszyny, np. obrabiarki, pojazdy, prasy, walcarki, krosna, drukarki,
- infrastrukturę, np. telekomunikację, sieci energetyczne, sieci wodociągowe,
- konstrukcje i urządzenia, np. windy, transportery, schody ruchome, sieć kolejową, satelity,
- automaty kontrolne, np. stanowiska pomiarowe, testery,
- przyrządy, np. czujniki, zegary, zamki, zawory,
- systemy informatyczne, np. komputery, sieci komórkowe, sieci komputerowe, Internet.

Wspólnymi cechami automatyzacji i robotyzacji są: komputeryzacja, stosowanie automatycznego sterowania i rozwój możliwości komunikacyjnych. Jeżeli robotyzacja polega w głównej mierze na automatyzacji ruchów i przemieszczeń, to automatyzacja bez użycia robotów obejmuje przede wszystkim dziedzinę oprogramowania, podejmowania decyzji, optymalizacji, planowania procesów, automatyzacji procesów, planowania zasobów produkcyjnych, e-usług, prac księgowych i finansowych, komunikacji.

## 1.4. Stopień automatyzacji i podatność procesu na automatyzację

Trudno sobie wyobrazić XXI w. bez komputerów, automatyki, nowych technologii i nowych materiałów. Przeważająca część ludności świata (75%) rozumie automatyzację jako częściowe lub całkowite zastąpienie pracy człowieka przez maszynowe wykonywanie fizycznych operacji oraz automatyczną realizację rozkazów przez komputer [Nof 2009]. O zmianach organizacyjnych uzyskanych dzięki technikom informatycznym oraz o inteligentnych obrabiarkach prawie nikt nie pamięta (2%), a przecież automatyzacja, robotyzacja oraz związana z tym komputeryzacja objęły wszystkie dziedziny działalności człowieka, także współczesne procesy wytwórcze i usługowe.

Tablica 1.1. Stopnie automatyzacji procesu wytwórczego

Poziom	Główna cecha procesu
18	Zapobieganie błędom i samooptrymalizacja procesu w trakcie jego trwania
17	Przewidywanie niezbędnych zadań, modyfikacja procesu
16	Korygowanie procesu w trakcie jego trwania
15	Korygowanie procesu po jego zakończeniu
14	Identyfikacja i wybór operacji
13	Segregacja wyrobów w zależności od pomiarów
12	Zmiana prędkości, pozycji, kierunku zależna od sygnału pomiarowego
11	Rejestr parametrów pracy
10	Wstępne nastawy sygnałów pomiarowych z korekcją błędów
9	Wyznaczanie charakterystyk wykonania
8	Maszyny uruchamiane przez wprowadzenie obrabianej części lub materiału
7	System maszyn ze zdalnym sterowaniem
6	Narzędzia zasilane, zaprogramowane: cykl operacji i sterowanie
5	Zasilane narzędzia jednofunkcyjne, stały cykl pracy
4	Obrabiarki ręcznie sterowane
3	Operacje wykonywane ręcznie narzędziami zasilanymi energią
2	Operacje wykonywane ręcznymi narzędziami
1	Operacje wykonywane ręcznie

Źródło: [Nof 2009].

Stopień automatyzacji procesów w poszczególnych gałęziach gospodarki jest zróżnicowany. Zależy to m.in. od charakteru procesu, szybkości jego przebiegu, etapów jego realizacji, charakteru poszczególnych operacji, dostępu do odpowiednich maszyn i urządzeń, źródeł energii, stopnia jego zorganizowania i zmechanizowania, miejsca, w którym proces przebiega. Są to czynniki natury organizacyjno-

-technologicznej. Równie ważne dla automatyzacji oraz robotyzacji procesów są ich aspekty ekonomiczne i efekty środowiskowe.

Stopień automatyzacji jest często określany jako stosunek liczby zautomatyzowanych operacji realizowanych przez urządzenia do ogólnej liczby operacji, jakie są niezbędne do wykonania danego procesu. Chęć uzyskania konkretnych wartości liczbowych stopnia automatyzacji zmusza jednak do ścisłej analizy wielu czynników istotnych dla procesu oraz do przyjęcia konkretnej metody obliczeniowej. Zwykle stosuje się dwa sposoby ustalenia stopnia automatyzacji.

1. Wartość stopnia automatyzacji jest wyznaczana na podstawie przyjętej skali odniesienia określającej poszczególne etapy automatyzacji danego procesu. Współczesne skale odniesienia są tworzone jako rozszerzenie historycznej już propozycji Brighta [Bright 1958, Świder 2002]. Przykład takiej skali przedstawiono w tablicy 1.1.
2. Stopień automatyzacji to proporcja między wielkościami charakteryzującymi właściwości procesu, które są osiągnięte autonomicznie (automatycznie, samoczynnie) i nieautonomicznie (np. konieczna jest ingerencja człowieka). Można rozważać m.in. następujące wielkości charakteryzujące proces: *liczba operacji, czas trwania cyklu, liczba przemieszczeń i ruchów*. Na przykład urządzenie, w którym 21 z 70 etapów procesu wykonywanych jest automatycznie, ma stopień 0,3. Porównywanie stopni automatyzacji uzyskanych dla różnych parametrów procesu nie wnosi zasadniczych informacji o samym procesie.

**Tablica 1.2. Kryteria oceny podatności procesu produkcyjnego na automatyzację**

Kryterium	Waga	Ocena punktowa			
		0	1	2	3
Eliminacja pracy człowieka	5	brak	możliwość obciążenia	częściowa	pełna
Wielkość serii	4	jednostkowa	masowa	wieloseryjna	średnioseryjna
Automatyczny przebieg proces	4	brak	trudna realizacja	łatwa realizacja	istnieje lub zbędny
Automatyczne mocowanie	3	brak	trudne	łatwe	zbędne
Ciężar przedmiotu	3	bardzo duży	duży	średni	mały
Odprowadzenie odpadów	3	brak	ręczne	automatyczne	zbędne
Odporność na zakłócenia	3	brak	niewielka	średnia	duża
Chwytność	4	złożony	normalny	typowy	prosty
Szeregowanie przedmiotów	5	nie istnieje	trudna	łatwa	istnieje
Obciążenie psychiczne	2	małe	średnie	duże	bardzo duże
Obciążenie fizyczne	4	małe	średnie	duże	bardzo duże
Warunki pracy	2	lekkie	średnie	ciężkie	bardzo ciężkie

Źródło: [Barczyk 2003].

Do oceny możliwości zautomatyzowania procesu stosuje się — szczególnie przy pracach remontowych — pojęcie podatności procesu na automatyzację. Podatność jest to łatwość, podatność do automatyzacji. J. Barczyk [Barczyk 2003] ocenia podatność procesu na automatyzację według pewnych kryteriów, m.in. wielkości serii, możliwości rezygnacji z udziału w procesie człowieka, ciężaru przedmiotu, odporności na zakłócenia. Kryteriom tym przypisane zostały subiektywne wagi oraz oceny punktowe. W tablicy 1.2 zamieszczono 12 podstawowych kryteriów, ich wagi i skalę punktową.

Podatność gospodarcza danej gałęzi jest tym większa, im większy jej potencjał gospodarczy, czyli możliwości finansowe, oraz im mniejsza efektywność procesu. Mała efektywność procesu to silny bodziec do jego ewentualnej automatyzacji. Przemysły: elektroniczny, elektrotechniczny i mechaniczny, mimo uzyskiwania wysokich efektywności — a właściwie dzięki nim — mają wysoką podatność na automatyzację.

## 1.5. Rozwój automatyzacji

Historia automatyzacji jest powiązana z historią rozwoju ludzkości. U zarania dziejów nie była to jednak współcześnie rozumiana automatyzacja, czyli zastąpienie człowieka przez urządzenia, które realizują procesy poznawcze, intelektualne i decyzyjne. Człowiek odgrywał wówczas rolę czujników i sterownika oraz zespołu elementów wykonawczych. Potrafił odczuwać, zapamiętywać, wykonywać, planować itd., miał zatem cechy, których żaden współczesny i przyszły automat ani robot nie będą mieć.

Prehistoria przyniosła sterylizację pożywienia, gotowanie wody, koło, oś, łożdź z odsadnią (pierwszy układ ze sprzężeniem zwrotnym, który zapewniał stabilność łożdzi), nawadnianie pól, obróbkę metali. Wynalezienie alfabetu zapoczątkowało nową epokę — starożytność. W tym czasie wynaleziono: przyrządy optyczne, zegar słoneczny i wodny, młyn wodny, mapy, katapultę, kompas, papier, proch. W pierwszym milenium n.e. pojawiły się fabryki, oczyszczalnie wody, proces destylacji, wiatraki, tamy, turbiny wodne, instrumenty nawigacyjne, automatycznie sterowane instrumenty muzyczne, samodzielnie napełniane lampy oliwne. W ciągu następnych 500 lat wynaleziono wahadło, koło zamachowe, rakiety, regulator przepływu wody, odlewanie metali, kalibrację.

Począwszy od XVI w. n.e. aż do lat 40. XX w., można mówić o epoce *przejdzącej komputerowe sterowanie*. Przed rewolucją przemysłową (za początek tej rewolucji uważa się zbudowanie przez Jamesa Watta w 1769 r. silnika parowego) znany już był zegarek kieszonkowy, zegar wahadłowy, samochód parowy, szybownik, młyny zbożowe, kotły parowe, piece przemysłowe. W wieku XVIII powstały urządzenia służące do regulacji poziomu wody, temperatury, ciśnienia, prędkości obrotowej. W wieku XVIII wynaleziono maszynę do pisania, statek parowy, balon na ogrzane powietrze. W dalszej kolejności — już w XIX w.

— powstały: automatyczny warsztat tkacki, winda osobowa, silnik elektryczny, telegraf, telefon, radiodbiornik, lampa rentgenowska, żarówka, ogniwo ołowiowo-kwasowe, elektryczny samochód, motocykl, automatyczna centrala telefoniczna, świetlna sygnalizacja drogowa, aparat fotograficzny, długopis, kombajn zbożowy, koparka.

Początek XX w. to burzliwy rozwój technik automatycznej regulacji, której celem było sterowanie i nawigacja okrętami oraz właśnie skonstruowanymi samolotami, a także sterowanie nakierowywaniem dział i artylerii przeciwlotniczej. Powstają wtedy: kompas żyroskopowy, radar, silnik odrzutowy, helikopter, maszyna analogowa, automatyczna linia montażowa, film i telewizja.

Revolucja komputerowa rozpoczęła się w latach 40. XX w. Na ten okres datuje się powstanie komputera lampowego, tranzystora, języka assembler, reaktora atomowego, zegara atomowego. Wprowadzenie technologii cyfrowych w latach 50. doprowadziło do olbrzymich zmian w sterowaniu automatycznym. Zaczęto masowo produkować komputery, zbudowano system operacyjny komputera, pojawił się język programowania FORTRAN, zastosowano twardy dysk oraz dyskietki, światłowody, układy scalone, rozpoczęto komputeryzację bankowości, wystrzelono satelity komunikacyjne. W medycynie zaczęto używać m.in. ultrasonografu i rozrusznika serca.

Z kolei w latach 60. pojawiły się laser, dysk optyczny, mikroprocesor, pamięć o swobodnym dostępie (RAM), CAD, CAM, skaner kodów kreskowych, RFID, mysz komputerowa, konsola gier wideo. Do przemysłu weszły roboty, zaczęto produkować nowoczesne, trwałe tkaniny.

Na lata 70. przypada zastosowanie sterowników PLC w przemyśle. Do użytku wchodzi m.in. edytor tekstu, e-mail, arkusz kalkulacyjny, systemy zarządzania bazą danych, drukarka laserowa, telefon komórkowy, komputer osobisty, protokół sieci i schemat okablowania Ethernet, komputerowo zintegrowane wytwarzanie (CIM), cyfrowy aparat fotograficzny i cyfrowa kamera. Możliwości diagnostyki medycznej rozszerzają rezonans magnetyczny i tomograf komputerowy.

W latach 80. rozszyfrowano kod DNA, opracowano protokoły transmisji internetowej TCP/IP, wyprodukowano płytę kompaktową, zbudowano elektronowy mikroskop skaningowy.

Język komputerowy Java, światowa sieć komputerowa WWW, wyszukiwarki internetowe, telewizja internetowa, system GPS, automatyczna sekretarka to niektóre osiągnięcia nauki i techniki lat 90.

XXI w. przyniósł następujące osiągnięcia techniki: sztuczną wątrobę, podawanie leków za pomocą ultradźwięków, komputer kieszonkowy (palmtop), pamięć USB, samoczyszczące się szyby, lądownik na Marsie, segway (dwukołowy pojazd sterowany przez komputer odpowiedzialny za utrzymanie równowagi).

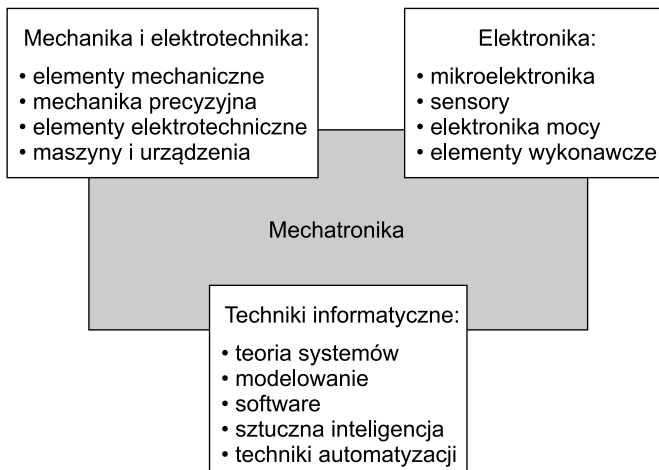
Wszystkie osiągnięcia automatyki zmieniają świat, sprawiają, że możliwe stały się loty kosmiczne, umieszczenie na orbitach Ziemi satelitów telekomunikacyjnych, bezpieczne podróże lotnicze, wprowadzono komputerowo zintegrowaną produkcję, nowe, bezpieczniejsze, mniej zanieczyszczające środowisko procesy chemiczne. Automatyka i robotyka są niezastąpione w nowoczesnej medycynie.

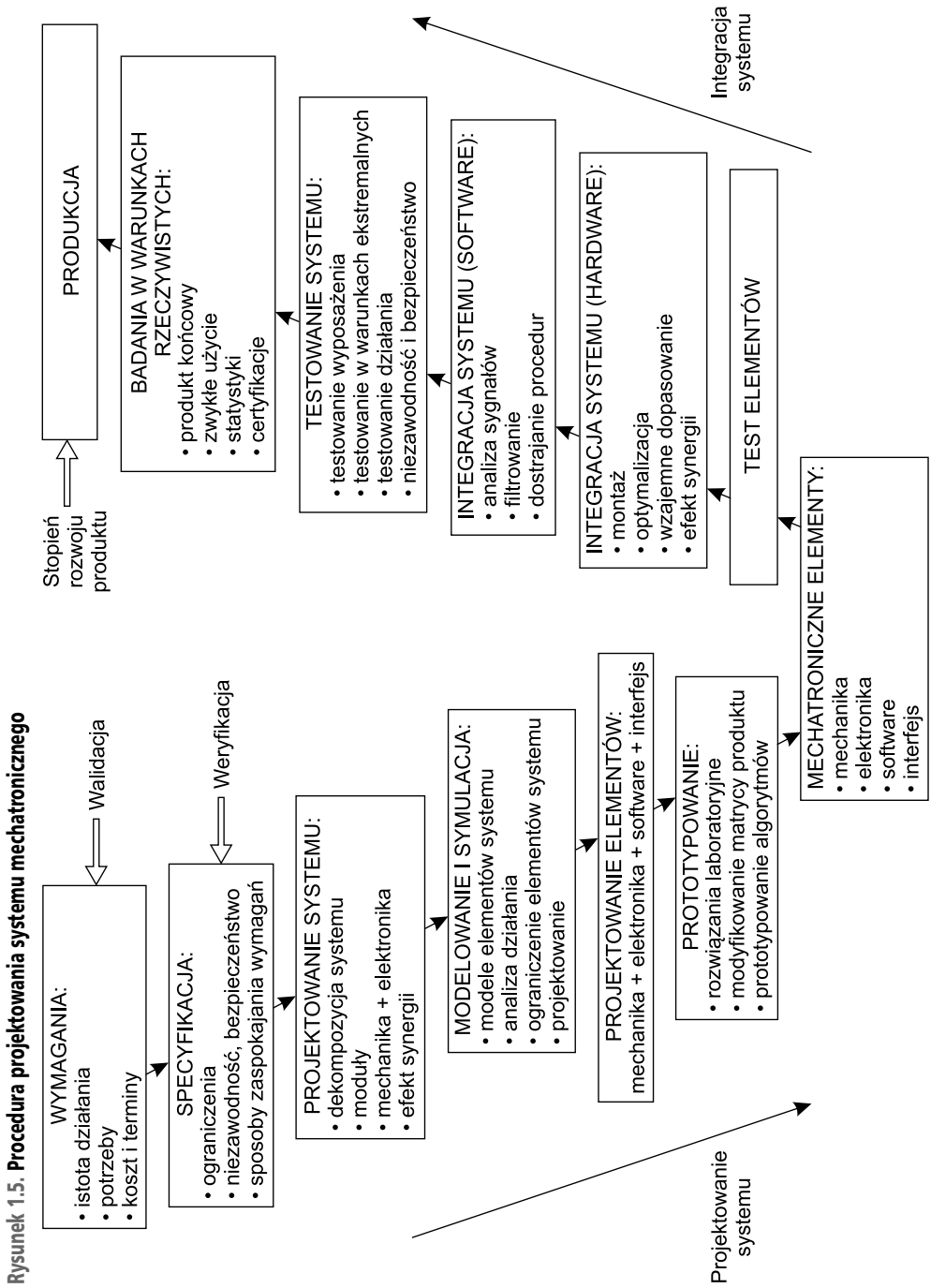
## 1.6. Systemy wytwórcze jako systemy mechatroniczne

Współczesne systemy wytwórcze mają złożoną, niejednorodną strukturę wewnętrzną przy spójnym i zewnętrznie jednolitym algorytmie funkcjonowania. Systemy wytwórcze łączą w sobie właściwie wszystkie osiągnięcia nauki i techniki, dlatego nie mogą zostać zaprojektowane przez pojedynczą osobę. Proces projektowania systemu wytwórczego to zadanie dla interdyscyplinarnego zespołu specjalistów, który potrafi wypracować płaszczyznę porozumiewania się między sobą. Poszczególni eksperci, specjaliści z wąskich dziedzin powinni mieć także wystarczającą wiedzę ogólną i doświadczenie, które pozwoli im znaleźć wspólny język z pozostałymi członkami zespołu. Taki prawdziwy zespół specjalistów jest w stanie wypracować współbieżne, mechatroniczne realizowanie projektu.

Mechatronika jest synergicznym połączeniem mechaniki z elektroniką i inteligentnym sterowaniem komputerowym w projektowaniu i wytwarzaniu produktów i procesów. Ta definicja obowiązywała w latach 90. XX w. Mówi się często, że mechatronika powinna być ograniczona tylko do fazy projektowania. Warto przytoczyć definicję M. Petki [Petko 2008]: „Patrząc na projektowanie jako iteracyjny proces optymalizacyjny z wielowymiarową przestrzenią poszukiwań, podejście mechatroniczne charakteryzuje się przeprowadzaniem poszukiwania przestrzeni możliwych rozwiązań równocześnie w wielu wymiarach z różnych dziedzin”. Oczywiście nie chodzi tylko o projektowanie samego wyrobu, ale równoczesne projektowanie wyrobu, procesu jego wytwarzania, procesu eksploatacji produktu i systemu wytwórczego. Można więc także powiedzieć za M. Tomizuką [Harshama i inni 1996]: „mechatronika jest synergiczną integracją systemów fizycznych, informatyki i złożonego podejmowania decyzji w projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji produktów i procesów przemysłowych”.

**Rysunek 1.4. Mechatronika — synergiczne połączenie różnych dziedzin**







*Dalsza część książki dostępna w wersji  
pełnej.*

