Spis treści

Przedmowa 11

Preface 12

Wstęp 13

1. Problemy automatyki 25

2. Modelowanie procesów dla celów sterowania 37
2.1. Wstęp 37
2.2. Modele stanu ustalonego obiektów liniowych i nieliniowych 42
2.3. Modele procesów dynamicznych 47
2.3.1. Modele sygnałów 47
2.3.2. Modelowanie układów ciągłych 49
2.3.3. Proste modele dynamiczne liniowe i analogie równań 50
2.3.4. Proste modele dynamiczne nieliniowe 55
2.3.5. Standardowe nieliniowości w równaniach różniczkowych 61

3. Analiza układów liniowych ciągłych w dziedzinie czasu 65
3.1. Równania różniczkowe 65
3.2. Równania różniczkowe stanu 66
3.3. Liniowe niestacjonarne równanie stanu 69
3.4. Liniowe stacjonarne równanie stanu 71
3.5. Transformacje liniowe zmiennych stanu 74
3.5.1. Transformacje macierzy stanu A układu MIMO do postaci Jordana 74
3.5.2. Równanie stanu dla układu SISO n-tego rzędu 75
3.5.3. Inna postać równania stanu 77
3.5.4. Transformacje dowolnej macierzy stanu A układu SISO do postaci Frobeniusa F 79
3.6. Splot i jego zastosowanie 82

4. Analiza układów liniowych ciągłych w dziedzinie częstotliwości 87
4.1. Transformata Laplace'a i jej cechy 87

4.1.1. Uwagi ogólne ... 87
4.1.2. Własności i przykłady transformat Laplace'a ... 88
4.2. Odwrotna transformata Laplace'a i jej zastosowanie ... 91
4.2.1. Odwrotna transformata Laplace'a ... 91
4.2.2. Rozwiązywanie równań różniczkowych techniką operatorową ... 92
4.3. Pojęcie transmitancji operatorowej układu liniowego ... 95
4.3.1. Własności transmitancji. Realizowalność fizyczna ... 96
4.3.2. Algebra schematów blokowych ... 99
4.3.3. Naturalne zmienne stanu dla obiektów typu SISO opisanych transmitancją ... 101
4.3.4. Transmitancja układów wielowymiarowych ... 104
4.3.5. Przykłady transmitancji układów skalarnych ... 106
4.3.6. Elektroniczna realizacja transmitancji ... 112
4.4. Związki transmitancji z odpowiedzią układu na wymuszenia harmoniczne ... 115
4.4.1. Odpowiedź układu I rzędu na sygnał sinusoidalny ... 115
4.4.2. Przechodzenie sygnałów wykładniczych przez układy liniowe ... 116
4.4.3. Charakterystyki częstotliwościowe układów dynamicznych ... 118
4.4.4. Układy nieminimalnofazowe ... 122
4.5. Przekształcenie Fouriera ... 123
4.5.1. Szereg Fouriera dla funkcji okresowej ... 123
4.5.2. Wzór całkowy Fouriera dla funkcji nieokresowej ... 124
4.5.3. Niektóre własności transformaty Fouriera ... 125
4.5.4. Związki pomiędzy charakterystykami częstotliwościowymi i impulsowymi ... 127
4.5.5. Częstotliwościowe kryterium realizowalności fizycznej ... 128
4.6. Analiza własności obiektu II rzędu ... 130
4.6.1. Odpowiedzi skokowe ... 130
4.6.2. Charakterystyka częstotliwościowa obiektu II rzędu ... 134
4.6.3. Analiza dynamiki układu II rzędu na płaszczyźnie fazowej ... 137
4.7. Układ III rzędu ... 139
4.8. Przykład analizy obiektu IV rzędu ... 144

5. Analiza układów liniowych dyskretnych ... 147
5.1. Podstawy równań różnicowych ... 148
5.2. Charakterystyczne postacie równań różnicowych ... 153
5.3. Analiza układów dyskretnych w dziedzinie czasu ... 155
5.3.1. Równanie stanu ... 155
5.3.2. Wykorzystanie splotu dyskretnego ... 159
5.4. Analiza układów dyskretnych w dziedzinie zmiennej zespolonej ... 162
5.4.1. Transformata Z ... 162
5.4.2. Aproksymacje transformat dyskretnych ... 169
5.4.3. Obiekty o nieskończonej i skończonej odpowiedzi implulsowej ... 171
5.4.4. Wybór okresu dyskretyzacji ... 174

6. Struktury systemów sterowania 177
6.1. Systemy automatyki procesowej i zabezpieczeniowej 177
6.2. Ogólny schemat układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym 180
6.3. Przykładowe realizacje jednowymiarowych układów regulacji SISO 181
6.3.1. Układ klasyczny 181
6.3.2. Układ kaskadowy 182
6.3.3. Układ adaptacyjny 183
6.4. Inne dwupętlowe struktury regulacji 186
6.4.1. Struktura ze sprzężeniem zwrotnym i sprzężeniem do przodu 186
6.4.2. Struktura z modelem wewnętrznym (IMC) 188
6.4.3. Zmodyfikowana struktura z modelem wewnętrznym (MFC) 190
6.5. Elementy, układy i systemy automatyki 191
6.6. Algorytmy ciągłej regulacji PID 193
6.7. Analogowe struktury regulatorów ciągłych 196
6.8. Algorytmy dyskretne regulatorów PID 198
6.9. Programowalne sterowniki logiczne PLC i nowe ich wersje PAC 201
6.10. Regulatory przekaźnikowe stosowane w układzie regulacji 206

7. Stabilność układów dynamicznych 209
7.1. Stabilność układów liniowych ciągłych 209
7.1.1. Stabilność względem warunków początkowych 209
7.1.2. Stabilność w sensie „ograniczone wejście-ograniczone wyjście” (BIBO) 211
7.1.3. Kryteria algebraiczne stabilności 214
7.1.4. Metody częstotliwościowe badania stabilności 223
7.1.5. Stan ustalony odpowiedzi niestabilnego układu liniowego 225
7.2. Stabilność układów liniowych dyskretnych 229
7.3. Stabilność układów nieliniowych ciągłych 234
7.3.1. Definicje stabilności rozwiązania 234
7.3.2. Punkty równowagi 236
7.3.3. Pierwsza metoda Lapunowa 237
7.3.4. Metoda Popowa 241
7.3.5. Metoda funkcji opisującej 245

8. Sterowalność i obserwowalność 253
8.1. Sterowalność 253
8.2. Stabilizowalność 262
8.3. Obserwowalność 266
8.4. Niezmienniczość sterowalności i obserwowalności 271
8.5. Zachowanie sterowalności i obserwowalności po dyskretyzacji układu ciągłego 272
8.6. Asymptotyczne różniczkowe estymatory stanu 273

9. Kryteria i dobór optymalnych nastaw regulatorów PID 277
9.1. Podstawowe kryteria jakości 277

9.2. Całkowe kryteria jakości ... 280
9.3. Formuły na liczenie całki z kwadratu błędu ... 283
9.4. Uogólnione kwadratowe kryterium całkowe ... 288
9.5. Całkowe kryterium z modułu błędu ... 291
9.6. Liniowe kryterium jakości ... 294
9.7. Inżynierskie metody strojenia regulatorów ... 295
9.7.1. Pierwsza metoda Zieglera–Nicholsa dla układów ciągłych ... 296
9.7.2. Druga metoda Zieglera–Nicholsa dla układów ciągłych ... 299
9.7.3. Metody Zieglera–Nicholsa dla układów dyskretnych ... 300
9.8. Strojenie regulatorów w zadaniach z niepewnością ... 301
9.8.1. Zakłócenia najbardziej niebezpieczne ... 301
9.8.2. Oszacowania maksymalnych odchyłek wyjścia ... 302

10. Przykład optymalizacji parametrycznej dla regulatora PI ... 309
10.1. Transmitancja wyparki ... 310
10.2. Identyfikacja wyparki ... 310
10.3. Stabilność układu zamkniętego z regulatorem PI dla toru zakłócenia ... 312
10.4. Sformułowanie zadania optymalizacji parametrycznej ... 314
10.5. Analityczne formuły dla kwadratowych wskaźników jakości ... 314
10.5.1. Optymalny regulator PI według całkowego wskaźnika kwadratu błędu ... 314
10.5.2. Optymalny regulator P według całkowego wskaźnika kwadratu błędu ... 318
10.5.3. Optymalny regulator PI według wskaźnika z kwadratu pochodnej błędu ... 319
10.6. Numeryczne wyniki symulacji układu optymalnego dla kryterium kwadratowego ... 324
10.7. Optymalizacja parametryczna dla innych wskaźników jakości ... 330

11. Metody projektowania regulatorów stanu ... 335
11.1. Metoda lokowania zer i biegunów ... 335
11.2. Minimalnonormowe sterowania programowe ... 340
11.3. Sterowanie modalne ... 342
11.4. Optymalny regulator liniowo-kwadratowy LQR ... 343
11.5. Nieliniowy czasooptymalny regulator od stanu ... 351

12. Klasyczne metody obserwacji stanu ... 359
12.1. Obserwatory asymptotyczne ... 359
12.1.1. Rola obserwatorów ... 359
12.1.2. Obserwatory asymptotyczne w układzie ze sprzężeniem zwrotnym ... 361
12.2. Obserwator Luenbergera ... 362
12.3. Optymalny filtr Kalmana ... 367

12.3.1. Ciągły filtr Kalmana 367
12.3.2. Dyskretny filtr Kalmana 370
12.3.3. Rozszerzony dyskretny filtr Kalmana 372

13. Całkowe metody dokładnej obserwacji stanu 375
13.1. Obserwatory dokładne w przestrzeni $L^2[0, T]$ 375
13.1.1. Przykład obserwatora całkowego odtwarzającego dokładnie stan końcowy 376
13.1.2. Ogólne warunki istnienia obserwatora całkowego 378
13.1.3. Optymalna postać obserwatora całkowego z minimalną normą 379
13.1.4. Optymalna postać obserwatora dla wybranych wag 383
13.2. Ogólna teoria obserwacji w przestrzeniach Hilberta 392
13.2.1. Warunki istnienia obserwatora 392
13.2.2. Optymalny obserwator skończonej liczby parametrów układu liniowego 395
13.2.3. Minimalnonormowa postać obserwatora 396
13.3. Przykład obserwacji całkowej w układzie o parametrach rozłożonych 398
13.3.1. Problemy obserwacji w układach o parametrach rozłożonych 398
13.3.2. Model procesu ciepłoprzewodnictwa 399
13.3.3. Obserwacja punktowa i uśredniona wyjścia 402
13.3.4. Obserwator dokładny. Przykład numeryczny 403
13.4. Ogólniejsza wersja optymalnego obserwatora całkowego w $L^2[0, T]$ dla zakłóceń należących do elipsoid 406

14. Obserwatory całkowe w układzie on-line 409
14.1. Obserwatory całkowe z przesuwanym i rozszerzanym oknem obserwacji 409
14.2. Analiza stabilności obserwatorów całkowych w układzie ze sprzężeniem zwrotnym 411

15. Dyskretne wersje obserwatorów dokładnych 417
15.1. Prosta wersja obserwatora przy dyskretnych pomiarach wyjścia 417
15.2. Uproszczona wersja minimalnonormowa obserwatora przy dyskretnych pomiarach wyjścia 419
15.3. Pełna wersja minimalnonormowa obserwatora przy dyskretnych pomiarach wyjścia i wejścia 420

16. Różniczkowe wersje obserwatorów dokładnych 425
16.1. Różniczkowa wersja obserwatora z rozszerzanym oknem obserwacji EWO 425
16.2. Różniczkowa wersja obserwatora EWO w ogólniejszym problemie z zakłóceniami niejednostkowymi 428

16.3. Różniczkowe wersje obserwatora z przesuwanym oknem obserwacji MWO 430
16.3.1. Różniczkowa wersja obserwatora z opóźnieniem 430
16.3.2. Różniczkowa wersja obserwatora różnicowego bez opóźnienia 431

17. Adaptacyjne algorytmy obserwatorów całkowych 435
17.1. Sekwencyjna współpraca obserwatora całkowego MWO i filtru Kalmana 435
17.2. Równoległa współpraca obserwatorów całkowych o różnych długościach okna 441

18. Modelowanie, obserwacja i sterowanie kolumną destylacyjną 445
18.1. Kolumna jako obiekt sterowania 445
18.2. Statyczny model kolumny destylacyjnej dwuskładnikowej 448
18.3. Dynamiczny nieliniowy model kolumny destylacyjnej dwuskładnikowej 453
18.4. Zlinearyzowany model kolumny destylacyjnej 456
18.5. Eksperymenty symulacyjne z wykorzystaniem rozszerzonego filtru Kalmana 459
18.6. Eksperymenty symulacyjne z wykorzystaniem obserwatora całkowego 460

19. Aneks 1. Elementy algebry liniowej 465
19.1. Macierz i jej zagadnienie własne 465
19.2. Przekształcenie podobieństwa i jego związek z bazą przestrzeni 466
19.3. Macierze wielomianowe 468
19.4. Macierz charakterystyczna i jej własności 469
19.5. Sprowadzanie macierzy A do postaci Jordana 470
19.6. Własności wektorów własnych prawo- i lewostronnych 474
19.7. Ogólne własności macierzy 476
19.8. Rozwiązywanie algebraicznego układu liniowego 478
19.9. Własności formy kwadratowej 481

20. Aneks 2. Podstawowe pojęcia analizy funkcjonalnej 485

21. Zakończenie 493

Literatura 495

Skorowidz 511

Przedmowa

Treścią książki są metody analizy i syntezy układów obserwacji i sterowania dynamicznymi procesami występującymi w ciągłych technologiach. Takie układy składają się na komputerowe systemy automatyki procesowej. Główny nacisk położono na prezentację nowych metod obserwacji związanych z odtwarzaniem niemierzalnych zmiennych stanu, czyli z techniką syntezy i konstrukcją obserwatorów stanu stosowanych w systemach stabilizacji układu. Od kilku lat przedmiotem badań naukowych autora są niestandardowe metody rekonstrukcji stanu opierające się na obserwatorach całkowych, które, w odróżnieniu od asymptotycznych obserwatorów różniczkowych typu filtru Kalmana, odtwarzają stan dokładnie w zadanym i skończonym czasie. W zastosowaniach on-line całkowe obserwatory stanu realizują zaawansowane przetwarzanie sygnałów wejścia i wyjścia w przesuwanych oknach pomiarowych o zadanej długości T – MWO (*Moving Windows Observer*). Obecne moce obliczeniowe systemów mikroprocesorowych są wystarczające dla stosowania prezentowanych algorytmów on-line, gwarantując skończony, zadany z góry czas wykonania zadania odtworzenia stanu. Ma to ważne znaczenie w komputerowych systemach czasu rzeczywistego. Klasyczne algorytmy różniczkowe dostarczają tylko wartość estymaty stanu z gwarancją jej asymptotycznej zbieżności do stanu rzeczywistego, ale w niesprecyzowanym bliżej czasie i bez możliwości podania aktualnego błędu estymacji. Do lat 90. tylko takie rekurencyjne algorytmy mogły być realizowane, ze względu na ograniczone moce komputerów.

W zakresie klasycznych i znanych metod modelowania i sterowania położony został nacisk na skrótową, ale wszechstronną ich prezentację, oraz możliwie dokładny ich opis matematyczny. Dla ilustracji problematyki w tekście zamieszczono przykłady obliczeniowe i numeryczne, a w aneksach zebrano podstawowe wiadomości z algebry liniowej, rachunku macierzowego i analizy funkcjonalnej. W książce autor starał się przedstawić całościową problematykę obserwacji skończenie wymiarowego wektora stanu w układach liniowych oraz zebrał swój dorobek naukowy w dziedzinie nowych metod obserwacji, może więc ona stanowić źródło do tej problematyki dla pracowników naukowych zainteresowanych tymi metodami. Książka napisana jest tak, by mogła być też wykorzystana przez studentów studiów doktoranckich kierunku automatyka i robotyka.

Preface

This book is about analysis and synthesis of observation and control methods designed for dynamic systems, which one can find in continuous processes technologies. These methods are implemented in control process and automation systems. The main emphasis was placed on presentation of new observation methods connected with reconstruction of inaccessible to measurement state variables, as well as on synthesis and designing of state observers used in computer stabilization systems. Since many years the author's research subject are nonstandard methods of state reconstruction based on integral observers, which distinct from asymptotic differential observers like Kalman Filter. The main difference is that the integral observers reconstruct the exact value of the state in finite time interval. In on-line mode these observers perform advanced processing of input/output signals on moving measurement windows with given length T – MWO (Moving Windows Observer).

Computational power of nowadays microprocessor systems is sufficient for on-line execution of presented algorithms and guarantee finishing of state reconstruction task in presumed time. It's essential property of each task in real-time multitasking computer systems. Classical differential algorithms supply only the value of state estimate and guarantee of its asymptotic convergence to real state, but in unknown time and with unknown error. Up to ninetieths only such recursive algorithms could be realized in on-line mode, because of computer possibilities.

In the field of known and classic methods of modeling and control, shortened but wide-range presentation was given with their precise mathematical description. For illustration of problems many numerical examples were placed in the text. In the end of the book two Appendixes were added in which basic formulas and theorems of linear algebra, matrix calculus and functional analysis were collected. The author tried to present in the book the broad scope of finite dimension state vector observation problems for linear systems as well as new results of his researches. Therefore this book can be treated as the source of this issues useful for scientific researchers interested in these topics. The book may also be suitable for PhD students in the field of Automatics and Robotics.

Wstęp

Navigare necesse est...
Pompejusz Wielki, według Plutarcha

Grecki wyraz *autos* oznacza – własny (przymiotnik) lub sam (zaimek). Stąd autobiografia – to własny życiorys, autograf własny podpis, autonomia to samodzielność, a autor to samodzielny twórca. Automat to urządzenie, które działa samoczynnie i wykonuje samopowtarzalną akcję (np. samoprzeładowująca się broń automatyczna).

Układ regulacji automatycznej to układ, który będzie samodzielnie sterował jakimś procesem. Obecność regulatorów w otaczających nas układach technicznych jest tak powszechna, że przestajemy ją postrzegać jako cechę nadzwyczajną i zaczynamy ją traktować jako nieodzowny składnik zapewniający wysoką jakość urządzenia. Konieczność wyposażenia dowolnego procesu fizycznego, którym chcemy sterować, w sprzęt automatyki wynika z potrzeby wykonania tego zadania lepiej, niż uzyskano by w wyniku sterowania ręcznego, a w końcu z chęci uwolnienia człowieka od bezpośredniego nadzoru nad tym procesem. Jakkolwiek pojęcie sterowania może być rozszerzone na każde zamierzone oddziaływanie na otaczające nas zjawiska i systemy – od zarządzania firmą poprzez sterowanie klimatyzacją, do lądowania na Księżycu, to głównym polem zastosowań dla inżyniera automatyka będą produkcyjne procesy technologiczne lub techniczne urządzenia użytkowe. Każde z nich musi być dziś wyposażone w sprzęt automatyki. Automatyczna skrzynia biegów, pralka automatyczna, pilot automatyczny – te nazwy są już właściwie nazwami własnymi. Nie przyjęły się nazwy „pilot elektroniczny" czy „pilot komputerowy", choć elektronika i informatyka stanowią „ciało" tego urządzenia samolotowego. Automatyka jest jednak jego istotą. Elektronika tworzy uniwersalną platformę sprzętową wykorzystywaną przez automatykę, na przykład w postaci kart pomiarowych czy komputera przetwarzającego dane, który tak jak obrabiarka jest cyfrową wersją precyzyjnego narzędzia. Informatycznym medium aktywującym to narzędzie i niosącym polecenia jego pracy jest program napisany w dowolnie wybranym języku i zawierający w sobie zakodowane reguły poszczególnych czynności. Sterowanie, jako zespół tych czynności, powinno charakteryzować się celowością, sensownością, sprawnością, niezawodnością, precyzją, a niekiedy samodzielną inteli-

gencją i powinno prowadzić do wykonania zaplanowanego zadania, czyli wykonania jakiegoś dzieła, mając dodatkowo na uwadze koszt jego tworzenia. Musi więc wcześniej powstać plan tego postępowania, czyli zostać stworzona strategia sterowania w odniesieniu do pojedynczego narzędzia, złożonego układu, czy w końcu całego systemu złożonego z układów.

Nauka, zajmująca się planowaniem i inżynierską implementacją takiej strategii sterowania, która przeprowadza obiekt sterowany z jednego stanu do innego, nazywana jest automatyką.

Gdy – pomimo nadciągającej burzy – wódz rzymski Pompejusz (w 50 r. p.n.e) musiał wypłynąć z portu, wypowiedział do marynarzy słowa, które znane są do dzisiaj: *Navigare necesse est, vivere non est necesse* (łac.) (Żeglowanie jest koniecznością, życie koniecznym nie jest). Żeglarze i podróżnicy przyjęli je jako swoje motto, ale niektórzy doszukują się w nich głębszych treści, parafrazując, że wytyczanie celów i ich osiąganie jest istotą życia ludzkiego. Wymaga to aktywnego oddziaływania na rzeczywistość w celu dokonywania zmian, czyli sterowania (*navigator* (łac.) – sternik).

Pierwsze urządzenia automatyczne powstawały już przed naszą erą, ale ich rozwój nastąpił w XVIII wieku (przykłady przedstawiono w rozdziale 1).

Dzisiejsi inżynierowie automatycy projektują i budują urządzenia sterujące, które przeprowadzają obiekty wzdłuż trajektorii ich ruchu. Trajektoria ta musi być wcześniej opracowana we współpracy z technologami danego procesu. Takimi podstawowymi urządzeniami sterującymi są regulatory, sterowniki cyfrowe, komputery sterujące oraz człony wykonawcze.

Użytkownika urządzeń technicznych nie dziwi obecność prostych regulatorów w żelazku, pralce, lodówce, klimatyzacji czy w spłuczce WC. Przyzwyczailiśmy się też do bardziej zaawansowanych układów regulacji, np. we współczesnych aparatach fotograficznych, w których w czasie pojedynczego naciskania na spust migawki zdąży zadziałać kolejno kilka układów automatyki:

- nastawiania ostrości obiektywu (autofocus),
- pomiaru światła i ustawiania przesłony/migawki,
- sterowania długością błysku flesza na podstawie pomiaru odbitego od obiektu światła,
- stabilizacji obrazu (w droższych modelach),
- przewinięcia klatki filmu lub przeładowania pamięci EPROM.

O istnieniu tych układów użytkownik wie, bo informują o tym instrukcje obsługi sprzętu. W wielu jednak urządzeniach jest automatyka, ale spełnia swoją rolę dyskretnie (nie wspominają o niej instrukcje użytkowania). Przeciętni użytkownicy telewizorów nie wiedzą więc o istnieniu układu automatycznej regulacji luminancji, układu regulacji wzmocnienia sygnału wizji ARW czy układu regulacji częstotliwości odchylania stabilizującego obraz. Nie każdy użytkownik komputera wie, że wewnątrz obudowy dysku twardego HD musi być układ regulatora do znalezienia ścieżki i stabilizacji położenia odczytująco-piszącej głowicy magnetycznej oraz układ stabilizacji prędkości obrotowej talerzy. W napędzie CD-ROM nad bezdotykowym śledzeniem przez głowicę laserową ślimakowo wypalonej ścieżki pracują cztery układy regulacji. Wszystkie zegary mechaniczne konstruowane od

1793 roku (A. Breguet) do dziś działają dokładnie, bo zawierają w sobie sprzężenie zwrotne stabilizujące częstotliwość drgań.

Liczba mikroprocesorowych układów automatyki w nowoczesnym samochodzie liczy się już w dziesiątki [0JUR], m.in. są to:

1) automatyczna skrzynia biegów;
2) automatyka kąta wyprzedzenia zapłonu i wtrysku paliwa;
3) automatyka czystości spalin (stabilizacja składu mieszanki lambda równe 1);
4) automatyczne ssanie (obroty biegu jałowego przy zimnym silniku);
5) stabilizacja temperatury płynu chłodzącego;
6) układ samoregulujący luz zaworowy;
7) system ABS – antypoślizgowy, pulsacyjnie hamujący auto na granicy poślizgu (1976 r.);
8) system ASR – kontroli trakcji, sterujący momentem napędowym przy przyśpieszaniu;
9) DSC lub ESP – system stabilizacji toru jazdy przez hamowanie wybranych kół;
10) AMVAR – nastawiania twardości zawieszenia hydraulicznego i stabilizacja przechyłów, zwany też CDC (*Continuous Damping Control*) lub ABC (*Active Body Control*),
11) automatyczne dostosowanie prześwitu zawieszenia do szybkości auta i terenu;
12) DAV – system inteligentnego wspomagania kierownicy (przełożenie zależne od szybkości);
13) TEMPOMAT – układ utrzymujący zadaną prędkość jazdy bez względu na kształt terenu;
14) ACC (*Adaptive Cruise Control*) – układ kontrolujący odległość od poprzednika w kolumnie (inna firmowa nazwa DISTRONIC);
15) HHC (*Hill Hold Control*) – układ automatyki hamulca ręcznego, samoczynnie zwalnianego przy ruszaniu pod górę (też HSA – *Hill Start Assist*);
16) EBP (*Electronic Brake Prefill*) – układ minimalizujący odstęp szczęk hamulcowych (wybierania luzu), gdy kierowca gwałtownie zdejmie nogę z pedału gazu;
17) układ realizujący skracanie i napinanie pasów bezpieczeństwa w razie kolizji;
18) układ uruchamiający poduszki automatyczne (czas reakcji 20 ms);
19) automatyczna klimatyzacja, osobna dla kierowcy i pasażera;
20) samoczynnie przełączające się światła z drogowych na mijania;
21) samoczynnie włączające się wycieraczki, których częstotliwość pracy jest uzależniona od szybkości auta;
22) inne mniej ważne układy działające automatycznie takie jak:
zmiana pozycji lusterek przy cofaniu, zapamiętywanie pozycji foteli, aktywne zagłówki przesuwające się do przodu w razie kolizji, alarm w razie kradzieży + immobilizer, zamykane automatycznie drzwi po uruchomieniu silnika, zmienny poziom głosu radia w zależności od szybkości i hałasu, samogaszące się z opóźnieniem światła mijania (po zaparkowaniu oświetlają jeszcze drogę kierowcy) i światła pod sufitem (oświetlają wnętrze jeszcze po zamknięciu drzwi).

Ciekawym układem automatyki samochodowej wykorzystującym sprzężenie zwrotne jest aktywny układ redukcji hałasu. Częstotliwościowa analiza szumu on-line, generacja szumu o przeciwnej fazie i podanie takiego dźwięku do słuchawek ma podnieść komfort pracy kierowców i operatorów ciężkiego sprzętu [0MET; 0HAE].

Pod kątem struktury sterowania i inteligencji, największym i najbardziej rozbudowanym z wymienionych systemów jest system stabilizacji toru jazdy zwany niekiedy popularnie ESP (*Electronic Stabilization Program*). Firmowe nazwy bardziej akcentują jego funkcje sterowania dynamicznego, np. DSC (*Dynamic Stabilization Control* – BMW), VDC (*Vehicle Dynamic Control* – Subaru, Alfa Romeo) lub VSC (*Vehicle Stabilization Control* – Toyota). System ten stabilizuje tor jazdy i podnosi poziom bezpieczeństwa aktywnego. Wcześniej zostały opracowane systemy, które zapobiegają poślizgom wzdłuż kierunku jazdy: system ABS do kontroli hamowania i ASR do kontroli trakcji (zwany też TCS-Seat lub TRC-Toyota). System ESP został opracowany w 1995 r. przez firmy Bosch i Mercedes. Współdziałając z ABS i ASR, przeciwdziała on poślizgom bocznym i obrotom wokół pionowej osi pojazdu. System musi rozpoznać różnicę między kierunkiem pożądanym a rzeczywistym. W tym celu analizuje prędkości poszczególnych kół oraz wykorzystuje informację z czujnika prędkości kątowej auta, bezwładnościowego czujnika przyspieszenia poprzecznego, kąta skrętu kierownicy, ciśnienia w układzie hamulcowym i urządzenia wtryskowego (obciążenie silnika). System wybiera koła, które powinny być przyhamowane. Dodatkowo system może redukować moment napędowy. Ta akcja wyprowadza samochód z poślizgu. Sterownik mikroprocesorowy pełni rolę wielowymiarowego regulatora cyfrowego obsługującego proces o wielu wejściach (cztery hamulce i pompa wtryskowa) i wielu wyjściach (prędkość, przyśpieszenie poprzeczne i moment obrotowy). Algorytm oprogramowania czasu rzeczywistego musi zawierać elementy inteligencji w ocenie faktu wystąpienia poślizgu bocznego (brak bezpośredniego czujnika np. wizyjnego wskazującego na zerwanie bocznej przyczepności opon) i wykazuje się bardzo szybką reakcją przeciwdziałającą temu poślizgowi.

Osobnym działem techniki, gdzie automatyka odgrywa decydującą rolę, są zastosowania lotnicze i rakietowe. Pierwsze wdrożone układy automatycznego sterowania i stabilizacji lotu zastosowano w pociskach V1 (1943–45 r.). Wyrzucane pod odpowiednim kątem, między innymi w stronę Londynu, utrzymywały zadany kierunek i wysokość dzięki wykorzystaniu układu pilota automatycznego działającego w oparciu o żyroskopy (zamknięta pętla regulacji), choć czas lotu był sterowany programowo przez zegar mechaniczny (tylko w pętli otwartej). Po upływie zadanego czasu zamykany był zawór paliwa i przestawiany ster wysokości. Pocisk spadał swobodnie i jeśli nie było wcześniej zakłóceń lotu, często trafiał w cel.

Pierwsze metody stabilizacji pionowego startu rakiet były testowane od 1935 r. w USA (Robert H. Goddard). Jednak pierwsze wdrożone rozwiązania pojawiły się w Niemczech (Wernher von Braun) pod koniec drugiej wojny światowej w rakietach V2. Zasięg tych rakiet nie przekraczał 300 km.

Po opanowaniu najważniejszych problemów inżynierskich związanych przede wszystkim z konstrukcją silników dużej mocy i opracowaniu wydajniejszych układów automatyki, systemy rakietowe pozwoliły na pierwsze krótkie loty okołoziemskie (Sputnik – 1957 r.). Od tego czasu sukcesywnie podnoszono niezawodność i precyzję sterowania układami latającymi. Celność dzisiejszych ziemskich rakiet typu Cruise i Tomahawk jest stuprocentowa. Wspomagane systemem GPS (*General Positioning System*) mają dodatkowo wizyjny układ

śledzenia terenu on-line i wybierania drogi zgodnie z mapą cyfrową umieszczoną w pamięci [0WWW].

Również sterowanie trajektorią lotu sond międzyplanetarnych osiąga dziś wysoką precyzję. Pierwszą sondą kosmiczną, która miała za zadanie trafić w mały obiekt oddalony o miliony kilometrów od Ziemi, była sonda Near Shoemaker opracowana przez zespół z Uniwersytetu Johna Hopkinsa. Sonda wystartowała w lutym 1996 r. i po przebyciu 4,7 mld kilometrów osiadła na podłużnej asteroidzie 433 Eros w lutym 2001 r., przesyłając do końca zdjęcia powierzchni (ostatnie z wysokości 120 m). Trafienie w obiekt o długości 40 km było możliwe poprzez wysokiej jakości wizyjne układy samonaprowadzające z dokładnością 50 mradianów/s i 16 silników korekcyjnych [0NEAR].

W październiku 1997 NASA Jet Propulsion Laboratory i European Space Agency wysłały z Florydy rakietą Tytan-4-Centaur, sondę kosmiczną Cassini (5,7 tony). Po 7 latach lotu (3,5 mld km), w styczniu 2005 sonda Cassini znalazła się w pobliżu Saturna i uwolniła próbnik lądujący Huygens, który wylądował na Tytanie – największym księżycu Saturna (średnica 5200 km) i zaczął przesyłać zdjęcia i pomiary.

W lutym 1999 r. wystrzelono sondę kosmiczną Stardust (380 kg), która w styczniu 2006 powróciła na Ziemię. Po siedmioletniej podróży i przebyciu 3,2 mld km sonda, przywiozła próbki cząsteczek z ogona komety Wild2, do której jądra zbliżyła się na odległość 250 km. Są to pierwsze w historii próbki dostarczone na Ziemię z takiej odległości.

Jeszcze większa precyzja sterowania musiała być zagwarantowana w ostatnim przedsięwzięciu. W styczniu 2005 NASA wystartowała sondę Deep Impact, która po przebyciu 431 mln km znalazła się w pobliżu komety Temple 1 (średnica jądra 6 km). W lipcu 2005, w odległości 864 tys. km od komety, sonda uwolniła autonomiczny próbnik (*Impact*). Próbnik o wadze 370 kg, wyposażony w optyczną aparaturę do samonaprowadzania z dokładnością 1 μradiana i w komputery sterujące gwarantujące precyzję sterowania z dokładnością 1 mm/s, wykonał manewr trafienia w jądro komety, wykonując po drodze serię zdjęć i pomiarów.

Szczegóły techniczne wszystkich misji i opisy układów sterujących są umieszczone na stronach WWW agencji NASA. Biorąc pod uwagę odległości i wielkość celów, należy z podziwem oceniać coraz większą precyzję aparatury pozycjonującej, komputerów sterujących oraz jakość oprogramowania sterującego.

Niestabilne zachowanie startującej pionowo rakiety może być zamodelowane zachowaniem się wahadła odwróconego, w którym środek ciężkości jest powyżej ruchomego punktu podparcia. Ruchomość punktu podparcia zapewnia w rakiecie odchylana główna dysza wylotu gazów, lub przy dyszach wielokrotnych – dozowanie paliwa do odpowiednich dysz, a w modelu wahadła np. ruchomy wózek.

Rozwój automatyki pilotażu w układach latających ma swoją długą historię [0PEM]. Pierwszy pełny przelot Atlantyku z użyciem pilota automatycznego miał miejsce w 1947 r. Wdrożenie w Europie w lotnictwie pasażerskim pilotażu automatycznego obejmującego fazę lądowania nastąpiło w 1969 r.

W klasycznych rozwiązaniach konstrukcyjnych samolotów, środek jego masy był położony przed usytuowanym na skrzydłach środkiem wyporu aerodynamicznego. Stąd dwie

siły skierowane w dół – ciężar i siła nacisku na duże tylne stateczniki (ustawione końcami do góry pod „ujemnym" kątem), równoważą centralną siłę wyporu skierowaną do góry. W locie poziomym samolot jest stabilny, bo małe wychylenia w pionie osi podłużnej samolotu są samoczynnie stabilizowane, bez ingerencji pilota, przez zanik lub wzrost siły nacisku pionowego na stateczniki tylne. Gdy dziób pochyla się w dół, siła nacisku na tylne stateczniki rośnie, gdy dziób odchyla się do góry siła nacisku na stateczniki maleje. Widoczny jest stabilny efekt dźwigni dwustronnej podpartej w punkcie wyporu. Ma on swój analog w wiszącej stabilnej pozycji wahadła pionowego [0GUB].

W nowoczesnych rozwiązaniach (Airbus A330, F16, Mirage 2000) środek wyporu jest wysunięty przed środek masy. Stąd dwie siły skierowane do góry – wypór skrzydeł i wypór na tylnych małych statecznikach (ustawionych w dół pod „dodatnim" kątem) powinny równoważyć centralną siłę ciężkości skierowaną w dół. Nie występuje tu samoczynny efekt wzrostu lub malenia siły wyporu na statecznikach tylnych w takiej dźwigni dwustronnej z punktem podparcia w środku ciężkości. Do stabilizacji poziomego lotu musi być zrealizowana aktywna funkcja reakcji tylnymi statecznikami i dodatkowo ciągiem silnika, wykonywana przez pilota lub pilota automatycznego. Taki układ odzwierciedla niestabilną reakcję wahadła odwróconego, w którym ruch wózka jest analogiem aktywnej reakcji stateczników. Umieszczenie w nowoczesnych konstrukcjach odrzutowych punktu przyłożenia siły wyporu przed środkiem ciężkości (bliżej dzioba) kwalifikuje je jako „statycznie niestabilne", co można interpretować jak wahadło odwrócone ułożone poziomo. Dodatkowo zastosowanie zmiennej geometrii dysz wylotowych daje efekt „wektorowania ciągu", co zwiększa zwrotność samolotu i zmniejsza zużycie paliwa, ale wymaga precyzyjnej stabilizacji sterami i ciągiem silnika. Bez pracującego silnika, dzisiejsze myśliwskie samoloty odrzutowe nie mogą latać. Dawne samoloty śmigłowe z „napędem przednim" były stabilniejsze w locie i mogły wylądować lotem ślizgowym [0STB]. Szczytem osiągnięć automatyki komputerowej był samolot Concorde, w którym zastosowano dynamiczne przesuwanie środka ciężkości dla prędkości poddźwiękowych i naddźwiękowych. Zmienną statykę uzyskiwano w czasie lotu poprzez przepompowywanie paliwa ze zbiorników przednich do tylnych.

W wielu procesach technologicznych obserwuje się zachowania niestabilne (np. reakcja łańcuchowa w reaktorze jądrowym). Procesy te wymagają niezawodnych algorytmów sterownia i pewnych układów automatyki. Niezawodność sprzętową uzyskuje się np. poprzez redundancję układów (nawet 3-krotną) [0STG]. Obowiązują tu dwie „szkoły": trzy takie same komputery z tym samym oprogramowaniem, które wyłączane są kolejno w razie ich awarii, lub trzy komputery różnych typów i trzy oprogramowania napisane niezależnie przez trzy różne zespoły, co ma wyeliminować ukryte „fabryczne" błędy sprzętu i oprogramowania.

Ważnym działem zastosowań automatyki, o którym należy wspomnieć, to robotyka. Oprócz dobrze poznanych i wdrożonych zadań sterowania ramionami manipulacyjnymi, inżynierskim celem jest zbudowanie robota kroczącego. Jest to z natury układ niestabilny. Wahadło odwrócone, w którym środek ciężkości jest powyżej ruchomego punktu podparcia, pokazuje problem stabilizacji takiego robota. Jego budowa to trudne zadanie – nie do pokonania bez wielu układów automatyki. Pierwowzorem jest żywy człowiek, którego cia-

ło ma 200 stopni swobody i nad którego stabilizacją chodu czuwają dziesiątki mięśni [0ABJ]. Nawet dla człowieka nauka chodzenia trwa rok, nauka jazdy na łyżwach, nartach czy rowerze też zabiera czas. Ryby kostnoszkieletowe również uzyskały ewolucyjnie zdolność do wykorzystania grawitacji, do zwiększenia zwrotności w czasie ucieczki. Ich środek ciężkości jest powyżej pęcherza pławnego (środka wyporu), stąd muszą, nawet w czasie spoczynku, utrzymywać cały czas równowagę ruchami płetw.

Jednym z pierwszych przykładów rozwiązania dwunożnego robota humanoidalnego jest robot ASIMO (*Advanced Step in Innovative Mobility*) japońskiej firmy Honda, o 26 stopniach swobody, którego opis można znaleźć na stronie internetowej [0ASIM]. W zewnętrznym komputerze sterującym, komunikującym się bezprzewodowo z robotem, znajdują się programy dla stabilizacji i płynności chodu, ruszania z miejsca, zatrzymywania się i wchodzenia po schodach. Dla płynnej zmiany kierunku, wymagało to np. opracowania sterowania opartego na predykcji ruchu, poprzez wcześniejsze przesunięcie w bok głównego środka ciężkości i pozycji stopy, zanim ruch do przodu zostanie wykonany (*Intelligent Walking Technology*). Wyzwaniem dla automatyki są więc samoczynne roboty, zdolne do podejmowania właściwej decyzji ze zbioru możliwości, przygotowanych przez projektanta.

Zastosowanie zaawansowanych systemów elektronicznych w rozbudowanych układach mechanicznych, ich wzajemna współpraca i przenikanie spowodowało, że na początku lat 90. w inżynierii mechanicznej powstał nowy termin na określenie takich technologii – mechatronika. Jej naturalne związki z robotyką i dyskusja o szerszym zakres badawczym tej dyscypliny są tematem całego numeru miesięcznika *IEEE Robotics & Automation Magazine* [0ALD].

Wiele układów technologicznych zachowuje się jednak stabilnie. Ich praca może być modelowana przez zachowanie się wahadła prostego w polu grawitacyjnym, wiszącego w swym stabilnym punkcie pracy, podczas gdy ruchomy punkt zaczepienia lub wyporu (którym można sterować) jest powyżej punktu ciężkości. Zachowanie takie pojawia się w układzie pracującej suwnicy, w zjawisku kołysania statku czy w locie balonu. Takie stabilne układy są łatwiejsze i bezpieczniejsze do sterowania. Łatwością sterowania można więc tłumaczyć wyższość przedniego napędu samochodu, gdy siła ciągu zaczepiona jest „powyżej" środka bezwładności („grawitacji") w takim poziomym wahadle. Popularnie mówi się, że taki podsterowny samochód nie wykazuje tendencji do zarzucania przy przyśpieszaniu. Tylny napęd samochodu, barki rzecznej czy łodzi motorowej wykazuje analogie do wahadła odwróconego. Jak wspomniano, takie układy strukturalnie niestabilne są jednak szybsze i przy precyzyjnym sterowaniu – wydajniejsze. Stąd w samochodach wyścigowych stosuje się ciągle tylny napęd. Mówi się, że przy przyśpieszaniu taki samochód wykazuje nadsterowność, czyli samorzutnie pogłębia zakręt, zarzucając tyłem.

Podobnie najnowsze rozwiązania napędu dużych statków pasażerskich stosują komputerowo sterowane, ruchome układy dwóch lub czterech pędników śrubowych podwieszanych obrotowo na rufie, co pozwoliło na całkowite zrezygnowanie z klasycznego steru kierunku, jednocześnie wielokrotnie podnosząc zwrotność statku. Dodatkowo wysuwane z kadłuba boczne płaszczyzny stabilizatorów o zmiennym kącie natarcia, zmniejszają kołysanie statku na fali.

Inne znane zastosowanie automatyki w wojsku to stabilizacja położenia lufy czołgu, co pozwala na prowadzenie ognia w czasie jazdy bez względu na nierówności terenu. Przykładem automatyki jest również konstrukcja helikopterowych układów naprowadzania na cel działek za pomocą ruchów głowy pilota (specjalny hełm), konstrukcja samonaprowadzających się pocisków, śledzących w podczerwieni fragmenty celu o podwyższonej temperaturze i w końcu samoloty pionowego startu.

Automatyka nie ominęła urządzeń medycznych, znajdując zastosowanie w automatycznych dozownikach insuliny, rozrusznikach serca [0MAE] czy w zaawansowanych narzędziach chirurgicznych. Do tych ostatnich należy np. laserowe urządzenie do operacji oka. Mimowolne ruchy gałki ocznej uniemożliwiłyby ręczne pozycjonowanie i prowadzenie promienia lasera przez chirurga. Kamera śledzi położenie źrenicy, zgodnie z jej ruchami układ automatyki natychmiast koryguje i dodatkowo przesuwa rzeczywisty promień lasera. Układ wizji koryguje też położenie obrazu oka na monitorze. Chirurg na ekranie widzi tylko nieruchomą źrenicę i miejsce operacji, odnosząc wrażenie nieruchomości pola operacyjnego oraz jedynej i pełnej kontroli nad promieniem lasera.

Jednym z nowszych rozwiązań automatyki, stosowanym od 1992 r. w nietypowej dziedzinie technologii, jest zastosowanie układów sterowania i stabilizacji w architekturze przy konstrukcji wieżowców i mostów wiszących. Specjalne aktywne tłumiki i duże masy (od 20÷60 ton) umieszczone na ostatnich piętrach wieżowców i poruszane po szynach za pomocą siłowników hydraulicznych zmieniają środek ciężkości wieżowca (wieżowiec też reprezentuje model wahadła odwróconego). Zapobiega to dużym wychyleniom konstrukcji w czasie wichur i trzęsień ziemi [0SPB]. Również automatyka zwykłych budynków w zakresie klimatyzacji, centralnego ogrzewania, sterowania oświetleniem, instalacją przeciwpożarową i alarmową wchodzi coraz bardziej do użytku, tworząc tzw. budynek inteligentny.

W najdłuższym wiszącym moście świata Honshu-Shikoku w cieśninie Akashi (Japonia) dwie 283-metrowe wieże oddalone od siebie o 2 km podtrzymują dwie czterokilometrowej długości liny nośne, na których podwieszona jest sześciopasmowa jezdnia. Konstrukcja mostu gwarantuje wytrzymanie efektów trzęsienia ziemi o sile 8,5 stopnia Richtera. We wnętrzu każdej ze stalowych wież znajduje się 20 aktywnych stabilizatorów masy, które są poruszane wahadłowo przez układy sterujące dla zapobiegania wychyleniom konstrukcji. Zdalny nadzór nad zachowaniem mostu prowadzony jest przez komputerowe centrum monitoringu mostu. Taka technologia staje się standardem. Widać ją również w oddanym do użytku w 2004 roku 2,25-kilometrowym moście wiszącym w Atenach. Umieszczono w nim 300 czujników naprężeń lin i trójkierunkowych czujników przyśpieszenia ruchu jezdni w celu monitorowania i ostrzegania przed drganiami i kołysaniami konstrukcji w czasie trzęsień ziemi [0REU]. Pomiary zbierane są przez cztery komputerowe jednostki akwizycji danych, które decydują o ostrzeganiu i wyłączaniu mostu z ruchu. Niedocenianie zagadnienia drgań konstrukcji mostowych było powodem poważnych katastrof. Na przykład w roku 1940 zerwaniu uległ długi most wiszący Narrows Bridge (853 m×12 m) w Tacoma (USA), gdy częstotliwość podmuchów wiatru zbliżyła się do częstotliwości drgań rezonansowych.

Również należy wspomnieć o nowoczesnych systemach produkcyjnych w rolnictwie i w przemyśle produkcji żywności. Automatyka znajduje tam zastosowanie w sterowaniu

mikroklimatem i biosferą szklarni i ferm (*greenhouses*) do podniesienia wydajności upraw. Metodologia modelowania i prognozowania matematycznego wywodząca się z automatyki, stosowana jest też do prognozowania ilości opadów i stanu pogody. Nadzorowanie zarówno wilgotności gleby pod uprawą, jak i wilgotności ziarna w elewatorach, pozwala na automatyczne uruchomienie systemów nawadniająco-zraszających lub suszących. Zagadnienia te są na tyle ważne, że został im poświęcony cały numer miesięcznika „IEEE Control Systems" [0SIG].

Aby zamknąć paletę różnorodności dziedzin stosowania automatyki, należy też wymienić nowoczesne systemy komputerowego sterowania systemami transportowymi. Dotyczy to np. systemów sterowania komunikacją publiczną miast, które pomagają w uniknięciu powstawania zatorów, zapewniają optymalną obsługę pasażerów i optymalne wykorzystanie taboru w sensie zużycia paliwa i minimalizacji zanieczyszczeń [0ADA]. Również w systemach kontroli ruchu lotniczego wykorzystuje się komputerowe metody wspomagania decyzji, jednak z uwagi na wymogi bezpieczeństwa, układy te wciąż nie doczekały się pełnej automatyzacji. Ale już największy na świecie lotniskowy system automatycznego transportu, śledzenia, identyfikacji i komputerowej dystrybucji bagażu pasażerskiego pomiędzy terminalami w Hongkongu, obejmujący 20 km linii taśmociągowych, jest w pełni zautomatyzowany i bezobsługowy.

Jednak oprócz tych spektakularnych dziedzin zastosowań automatyki, wciąż największy obszar zajmują procesy przemysłowe o technologii ciągłej i dyskretnej. Produkcja wyrobów hutniczych stali i szkła, chemicznych, paliwowych, budowlanych, wytwarzania energii oraz innych wyrobów przemysłu lekkiego to podstawowe pole aplikacji automatyki. Zwłaszcza rozbudowane są komputerowe systemy sterowania w kompleksowych procesach technologicznych. Zaangażowanie do tych systemów sprzętu programowalnego, który zrealizowałby skomplikowane procedury nadzoru i sterowania on-line setek zmiennych procesowych, jest tak duże, że dziś inżynierowie automatyki musieli opanować też dziedzinę **informatyki technicznej**. Nie wystarcza już znajomość reguł i metod sterowania, potrzebna jest do tego celu umiejętność tworzenia profesjonalnego oprogramowania czasu rzeczywistego. Szersze spojrzenie na **informatykę techniczną** wskazuje na jej powiązania z **informatykę zarządzania** zajmującą się zbieraniem i przetwarzaniem informacji na cele zarządzania. Bardzo często te dwa wspomniane profile występują nierozłącznie w dużych nowoczesnych wielozakładowych przedsiębiorstwach, w postaci komputerowych systemów zintegrowanych CIM (*Computer Integrated Systems*), definiując hierarchiczną wielopoziomową i wielowarstwową strukturę zarządzania i sterowania. Na każdym poziomie występuje zróżnicowanie tych systemów zarówno w warstwie sprzętowej, jak i programowej. Poziom najniższy (*Primary Control*) dotyczy sterowania procesem technologicznym i zawiera problematykę czujników, cyfrowych przetworników, programowalnych sterowników, interfejsów przemysłowych i komputerowych systemów sterowania bezpośredniego (*Direct Control*) oraz nadrzędnego (*Supervisory Control*). Wiąże się z tym zagadnienie oprogramowania tych systemów, z reguły z wykorzystaniem systemów operacyjnych czasu rzeczywistego i systemów wizualizacji typu SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Systemy te wyposażone w bazy wiedzy i reguły eksperckie wykazują cechy

inteligentnego operatora, np. w sytuacjach krytycznych zapewniając automatyczne zamykanie awaryjnych cykli produkcyjnych ESS (*Emergency Shutdown Systems*).

Oprogramowanie poziomów wyższych przedsiębiorstwa wiąże się głównie z oprogramowaniem systemów MRP (*Manufacturing Resource Planning*) i dotyczy systemu informatycznego zarządzania przedsiębiorstwem w działach zaopatrzenia, produkcji, marketingu, sprzedaży, finansów i kadr.

W przedstawionym skrótowym zestawieniu zadań automatyki omawiano głównie problemy, które można ogólnie ująć jako problemy automatyki procesowej (*Control Process Systems*). Zadaniem tych systemów jest najlepsze przeprowadzanie procesu technologicznego pomiędzy kolejnymi punktami pracy, a w końcu prowadzenie procesu w pobliżu wybranego optymalnego punktu tak, aby bez względu na zakłócenia otrzymywać produkt o wysokiej jakości, w sposób wydajny i oszczędny.

Inżynierowie wdrażający układy automatyki, mają jednak też na uwadze inny typ układów, które mają też do spełnienia inne funkcje – pilnują granic bezpieczeństwa obszaru pracy. Są to układy automatyki zabezpieczeniowej SIS (*Safety Instrumented Systems*). Mają one za zadanie pilnowanie bezpiecznej odległości zmiennych procesowych od ich ograniczeń – co ma gwarantować pozostawanie punktu pracy w obszarze stabilności. Układy te są odpowiedzialne za rozpoznawanie zakłóceń najbardziej niebezpiecznych i sytuacji awaryjnych. Do ich zadań należy alarmowanie o przekroczeniu ograniczeń technicznych i technologicznych, wyłączanie zepsutych i włączanie zapasowych urządzeń pomiarowo-kontrolnych (które pracują na zasadach gorącej rezerwy albo oczekiwania) takich, jak czujniki, przetworniki, regulatory, nastawniki, tory pomiarowo-komunikacyjne, zamykanie lokalnych niebezpiecznych cykli produkcyjnych, włączanie sekwencji blokad i awaryjne odstawianie instalacji.

W książkach poświęconych teorii technik sterowania dynamicznego mało miejsca przeznacza się dla układów SIS, wychodząc z założenia, że są to głównie problemy sekwencyjno-logiczne. Należy jednak zwrócić uwagę, że te zagadnienia mogą również stawiać trudne teoretyczne zadania do rozwiązania, takie jak projektowanie układów diagnostyki i układów odpornych na awarie [0BLM]. Łączenie układów automatyki procesowej i zabezpieczeniowej w jednych urządzeniach (np. w jednym sterowniku PLC) jest zabronione, zwłaszcza dla procesów, w których występuje ryzyko katastrofalnej awarii. W celu podniesienia niezawodności układu automatyki, międzynarodowe unormowania zalecają, dla instalacji przemysłowych, rozdzielanie funkcji sterujących od funkcji zabezpieczeń. Błędy automatyki zabezpieczeniowej (awarie sprzętowe i błędy oprogramowania) wraz z błędami operatorów mogą doprowadzić do poważnych katastrof, np. elektrowni jądrowych (Czarnobyl) czy instalacji chemicznych (Bhopal – Indie).

W niniejszej książce główną uwagę skupiono na automatyce procesowej, jakkolwiek problemy automatyki zabezpieczeniowej omówiono szerzej w rozdziale 6.

Z tego krótkiego wstępu ma wynikać ważna rola automatyki i konieczność obecności jej układów, we wszystkich urządzeniach technicznych, w których zachodzą jakiekolwiek zmiany wielkości fizycznych, nad którymi chcielibyśmy panować. Nieraz użytkownik chciałby, aby pomimo pojawienia się zewnętrznych zakłóceń nie obserwowano zmian

zmiennych procesowych, np. zmiany temperatury w akwarium, zmiany częstotliwości nastrojonej automatycznie stacji radiowej (co eliminuje zanikanie głosu), ustalonej pozycji satelity na orbicie geostacjonarnej. Nieraz natomiast pożądane jest, aby zmiany pewnych wielkości mogły być duże i mogły zachodzić tak szybko, jak sobie tego życzymy, np. zmiana temperatury stopki żelazka przy przestawieniu pozycji zadajnika temperatury z „nylon" na „bawełna", przejście do nowego punktu pracy instalacji chemicznej czy pościg za uciekającym celem przez rakietę „ziemia-powietrze".

Urządzenia automatyki można więc znaleźć wszędzie. Podnoszą one standard życia, jak również wydajność i bezpieczeństwo procesów technologicznych.

Czy nauka zwana automatyką, teorią sterowania lub cybernetyką techniczną odkryła już wszystkie metody i algorytmy związane z techniką sterowania? Z jednej strony wiadomo, że poziom teorii i całej wiedzy na ten temat oraz poziom dzisiejszej elektroniki wystarczają do budowy bardzo wydajnych procesorów sterujących, zapewniających precyzyjną pracę urządzeń technicznych, których celem jest albo wykonanie produktu o gwarantowanej jakości (stężenie 0,9999), albo wykonanie czynności z gwarantowaną precyzją (samoczynne lądowanie samolotu). W wielu jednak zadaniach sterowania nie wiadomo, jak budować sterowniki, zwłaszcza dla układów nieliniowych, wielowymiarowych czy wysokiego rzędu, których inteligencja wykazywałaby dodatkowo cechy adaptacyjności do zmiennych warunków. Inżynieria, na przykład, nie umie budować małych urządzeń latających MAV (*Micro Air Vehicles*), które potrafiłyby latać tak precyzyjnie jak mucha [0ŻBR]. Wydaje się, że dzisiejsze algorytmy sterowania polegające na wykorzystaniu pomiarów z kilkunastu czy kilkudziesięciu czujników i przeliczaniu skomplikowanego zestawu równań różniczkowych modelu (np. 1,1 mln linii kodu dla modelu samolotu LMC F35) przegrywają z systemem sterującym muchy, która używa pomiarów z 80 000 czujników rozrzuconych na ciele. Mózg muchy zbudowany jest zaledwie z 338 000 neuronów. Gdyby traktować neuron jako przerzutnik w układzie cyfrowym, to układ mózgu posiadałby niewielką moc małego procesora. W mózgu główną rolę odgrywa jednak też ilość połączeń, a neuron pracuje analogowo, a nie binarnie. Pomimo to szacuje się, że mózg muchy 98% mocy poświęca przetwarzaniu sygnałów, a tylko 2% rozpoznawaniu niebezpieczeństwa i algorytmom sterowania [0ŻBR1; 0SZJ].

Również bardzo charakterystyczną cechą obwodowego układu nerwowego człowieka jest duża przewaga nerwów czuciowych – aferentnych (95%), doprowadzających sygnały sensoryczne słuchowe, wzrokowe, węchowe, skórne, trzewne i inne do mózgu, w stosunku do nerwów ruchowych – eferentnych (5%) odprowadzających sygnały z mózgu do niewielu narządów wykonawczych (mięśnie, gruczoły). Efektywne sterowanie opiera się więc na możliwie pełnej informacji pomiarowej, przetwarzanej dla prostego modelu.

W układach technologicznych montaż wielu czujników fizycznych zmiennych procesowych może być nieopłacalny. Przyszłością mogą więc być czujniki programowe (*softsensors)*, zbudowane dla niemierzalnych zmiennych stanu przy wykorzystaniu zmiennych mierzalnych i obserwatorów stanu. Obecność tych ostatnich komplikuje budowę warstwy przetwarzania sygnałów (*preprocessing*), ale upraszcza warstwę sterowania (np. regulatory proporcjonalne LQR – *Linear Quadratic Regulator*).

W niniejszej monografii położono duży nacisk na nowe metody obserwacji stanu.

W kraju i zagranicą co roku ukazują się różne monograficzne opracowania z dziedziny automatyki. Niektóre oferują szersze spojrzenie na całokształt tematyki, np. [0CAF; 0FRB; 0GOG; 0KAT; 0MAJ; 0RUW; 0SOE; 0ŻAS]. Inne koncentrują się na wybranych aspektach dziedziny, np. [0FRG; 0GOH1; 0GOH2; 0SOT; 0WEP; 0WAK].

Celem niniejszej monografii jest przedstawienie całokształtu nowych wyników uzyskanych przez autora w tematyce obserwacji stanu. Odtwarzanie niemierzalnego wektora stanu na podstawie pomiarów wyjścia procesu znajduje zastosowanie zarówno w zagadnieniach sterowania, jak i diagnostyki (*soft sensoring*). W zakresie klasycznych metod modelowania i sterowania autor dokonał wyboru i prezentacji tych zagadnień, które mogły być pomocne w omówieniu zagadnień sterowania od stanu, akcentując na opracowanych przez siebie przykładach zakres ich stosowalności. Niektóre przykłady są bardziej rozbudowane i prezentują tzw. C*ase Study* (podrozdz. 2.3.4, rozdz. 10 i 18).

W pierwszych pięciu rozdziałach monografii przedstawiono skrótową prezentację zagadnień modelowania i analizy dynamiki systemów skończenie wymiarowych. Zaakcentowano fenomen zjawiska sprzężenia zwrotnego, przedstawiając możliwość jego wykorzystania np. do identyfikacji stanów ustalonych i charakterystyk układów niestabilnych. Omówiono własności układów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. W rozdziale 6 przedstawiono klasyczne i nietypowe struktury układów regulacji. W następnych rozdziałach przedstawiono metody projektowania regulatorów od wyjścia i od stanu, również w obecności zakłóceń najbardziej niebezpiecznych. Główna problematyka monografii dotycząca obserwacji i odtwarzania niemierzalnego wektora stanu obejmuje podrozdział 8.3 oraz rozdziały 12, 13, 14, 15, 16, 17 i 18. W dwóch aneksach w sposób zwarty umieszczono najważniejsze zagadnienia algebry macierzowej i analizy funkcjonalnej.

Monografia opiera się między innymi na wieloletnich wynikach badań i doświadczeniach zdobytych przez autora przy tworzeniu i wdrażaniu komputerowych systemów sterowania [18BYW1; 18BYW2; 18BYW3; 18BYW4; 18BYW5; 18BYW6; 18BYW7; 18BYW8].