

SPIS TREŚCI

	Strona
PRZEDMOWA	11
1. WPROWADZENIE DO TEMATYKI UKŁADÓW STEROWANIA ..	15
1.1. Wprowadzenie	15
1.2. Krótka historia rozwoju sterowania automatycznego.....	16
1.3. Pojęcia podstawowe	20
1.4. Prosty układ sterowania.....	23
1.5. Efekty zastosowania sprzężenia zwrotnego.....	25
1.5.1. Wpływ sprzężenia zwrotnego na wzmocnienie całkowite.....	25
1.5.2. Wpływ sprzężenia zwrotnego na stabilność.....	26
1.5.3. Wpływ sprzężenia zwrotnego na wrażliwość	27
1.5.4. Wpływ sprzężenia zwrotnego na zdolność tłumienia oddziaływania zakłóceń zewnętrznych i szumów.....	27
1.6. Metody klasyfikacji stosowane w teorii sterowania	28
1.6.1. Układy statyczne i dynamiczne.....	29
1.6.2. Układy stacjonarne i niestacjonarne	30
1.6.3. Układy liniowe i nieliniowe.....	30
1.6.4. Układy o stanach ciągłych i stanach dyskretnych	31
1.6.5. Układy deterministyczne i stochastyczne	31
1.6.6. Układy ciągłe i dyskretno.....	31
1.7. Zagadnienia kontrolne	32
2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE UKŁADÓW FIZYCZNYCH	34
2.1. Wprowadzenie	34
2.2. Modele opisujące obwody elektryczne.....	34
2.3. Modelowanie układów mechanicznych.....	41
2.4. Czujniki stosowane w układach sterowania.....	46
2.4.1. Potencjometry	46
2.4.2. Tachoprądnice	47
2.4.3. Enkodery.....	47
2.5. Silniki prądu stałego.....	47
2.6. Modele przepływu ciepła.....	51
2.7. Magazynowanie i przepływ cieczy	52
2.8. Linearyzacja układów nieliniowych.....	55
2.9. Złożone układy mechaniczne	58
2.10. Zagadnienia kontrolne.....	63
2.11. Zadania do samodzielnego rozwiązania	64

	Strona
3. PODSTAWY MATEMATYCZNE	66
3.1. Wprowadzenie	66
3.2. Funkcje zespolone	66
3.2.1. Zmienna zespolona	66
3.2.2. Funkcje zmiennej zespolonej	67
3.2.3. Funkcja analityczna	68
3.2.4. Nieokreśloności i bieguny funkcji	68
3.2.5. Zera funkcji	69
3.3. Równania różniczkowe	69
3.3.1. Liniowe równania różniczkowe	69
3.3.2. Nieliniowe równania różniczkowe	73
3.3.3. Równania różniczkowe pierwszego rzędu: równania stanu	74
3.3.4. Wektorowo-macierzowa postać równań stanu	76
3.4. Przekształcenie Laplace'a	76
3.4.1. Definicja przekształcenia Laplace'a	77
3.4.2. Odwrotne przekształcenie Laplace'a	82
3.4.3. Ważne twierdzenia dotyczące przekształcenia Laplace'a	83
3.5. Wyznaczanie oryginału transformaty Laplace'a	86
3.5.1. Analityczny rozkład transformaty złożonej na ułamki proste	88
3.5.2. Rozkład funkcji operatorowej z wykorzystaniem komputera	94
3.6. Zastosowanie przekształcenia Laplace'a do rozwiązywania równań różniczkowych	98
3.7. Zagadnienia kontrolne	101
3.8. Zadania do samodzielnego rozwiązania	102
4. TRANSMITANCJA, SCHEMATY BLOKOWE	107
4.1. Wprowadzenie	107
4.2. Transmitancja układów liniowych	107
4.2.1. Transmitancja operatorowa	108
4.2.2. Składniki odpowiedzi impulsowej układu	110
4.2.3. Wyznaczanie zer i biegunów transmitancji w programie MATLAB	117
4.3. Elementy składowe schematu blokowego	118
4.4. Zasady przekształcania schematów blokowych	119
4.5. Wyznaczanie transmitancji wypadkowych przy użyciu programu MATLAB	123
4.6. Wyznaczanie transmitancji wypadkowej przy użyciu reguły wzmocnień Masona	126
4.7. Zagadnienia kontrolne	129
4.8. Zadania do samodzielnego rozwiązania	129

	Strona
5. RÓWNANIA STANU I WYJŚCIA	139
5.1. Wprowadzenie	139
5.2. Wektorowo-macierzowy opis układów liniowych stacjonarnych.....	140
5.3. Zmienne stanu układu dynamicznego	141
5.4. Równanie tranzycji stanu.....	144
5.5. Rozwiązanie równania stanu.....	147
5.6. Zależność pomiędzy równaniami stanu a równaniem różniczkowym wyższego rzędu	149
5.7. Zależność pomiędzy równaniami stanu a transmitancją.....	151
5.8. Równanie charakterystyczne.....	153
5.8.1. Równanie charakterystyczne uzyskiwane na podstawie równania różniczkowego	153
5.8.2. Równanie charakterystyczne uzyskiwane na podstawie transmitancji.....	153
5.8.3. Równanie charakterystyczne uzyskiwane na podstawie równań stanu	154
5.9. Wartości i wektory własne.....	154
5.9.1. Wartości własne	154
5.9.2. Wektory własne.....	154
5.10. Przekształcanie równań stanu przez podobieństwo	157
5.10.1. Postać kanoniczna sterowalna	158
5.10.2. Postać kanoniczna obserwowalna	160
5.10.3. Postać kanoniczna diagonalna.....	163
5.10.4. Postać kanoniczna diagonalna Jordana	165
5.11. Dekompozycja transmitancji	166
5.11.1. Dekompozycja bezpośrednia	168
5.11.2. Dekompozycja równoległa do postaci kanonicznej diagonalnej	174
5.11.3. Dekompozycja kaskadowa	177
5.12. Sterowalność układów liniowych	179
5.12.1. Ogólna koncepcja sterowalności.....	180
5.12.2. Definicja sterowalności	181
5.12.3. Metody badania sterowalności.....	182
5.13. Obserwowalność układów liniowych	184
5.13.1. Definicja obserwowalności.....	184
5.13.2. Metody badania obserwowalności	184
5.14. Zależność pomiędzy sterowalnością, obserwowalnością i transmitancją.....	187

	Strona
5.15. Zagadnienia kontrolne.....	189
5.16. Zadania do samodzielnego rozwiązania.....	190
6. STABILNOŚĆ UKŁADÓW STEROWANIA LINIOWEGO.....	194
6.1. Wprowadzenie	194
6.2. Stabilność typu ograniczone wejście – ograniczone wyjście.....	194
6.3. Stabilność asymptotyczna układów ciągłych.....	196
6.4. Metody określania stabilności zamkniętego układu regulacji.....	198
6.5. Kryterium Hurwitza i Routha	199
6.5.1. Kryterium Hurwitza.....	200
6.5.2. Tablica Routha	200
6.5.3. Przypadki szczególne tablicy Routha	203
6.6. Układy ze strojonymi parametrami	208
6.7. Zagadnienia kontrolne	210
6.8. Zadania do samodzielnego rozwiązania	211
7. ANALIZA UKŁADÓW STEROWANIA W DZIEDZINIE CZASU	216
7.1. Wprowadzenie	216
7.2. Typowe sygnały testowe stosowane w układach sterowania	217
7.2.1. Wejściowa funkcja skokowa.....	218
7.2.2. Wejściowa funkcja liniowo narastająca w czasie.....	219
7.2.3. Wejściowa funkcja paraboliczna	219
7.3. Uchyb w stanie ustalonym w liniowych układach ciągłych	220
7.3.1. Typy układów sterowania	222
7.3.2. Sygnał zadany o postaci funkcji skokowej	222
7.3.3. Sygnał zadany o postaci funkcja liniowo narastającej.....	223
7.3.4. Sygnał zadany o postaci paraboli	223
7.4. Jednostkowa odpowiedź skokowa i czasowe wskaźniki jakości	229
7.5. Odpowiedź przejściowa prototypowego układu II rzędu	231
7.5.1. Przekształcanie wymagań projektowych prototypowego układu II rzędu na płaszczyznę s	236
7.6. Wpływ dodatkowych zer i biegunów na odpowiedzi czasowe prototypowego układu II rzędu	239
7.6.1. Dodatkowy biegun transmitancji w torze bezpośrednim	239
7.6.2. Dodanie bieguna do transmitancji układu zamkniętego	241
7.6.3. Dodanie zera do transmitancji układu zamkniętego	242
7.6.4. Dodatkowe zero w transmitancji w torze bezpośrednim	244
7.7. Dominujące bieguny transmitancji.....	245

	Strona
7.8. Zagadnienia kontrolne.....	247
7.9. Zadania do samodzielnego rozwiązania.....	248
8. LINIE PIERWIASTKOWE	258
8.1. Wprowadzenie	258
8.2. Podstawowe własności linii pierwiastkowych	259
8.3. Własności i konstrukcja linii pierwiastkowych.....	263
8.3.1. Punkty dla $K = 0$ oraz $K = \pm\infty$	263
8.3.2. Liczba gałęzi na linii pierwiastkowej	264
8.3.3. Symetria linii pierwiastkowej.....	264
8.3.4. Kąty asymptot linii pierwiastkowej	266
8.3.5. Punkty przecięcia asymptot.....	266
8.3.6. Linie pierwiastkowe na osi liczb rzeczywistych	268
8.3.7. Kąty wyjścia i kąty wejścia linii pierwiastkowych.....	269
8.3.8. Punkty przecięcia linii pierwiastkowych z osią liczb urojonych..	271
8.3.9. Punkty rozgałęzień na liniach pierwiastkowych	271
8.3.10. Obliczanie K z linii pierwiastkowej.....	274
8.3.11. Zasady konstruowania linii pierwiastkowych	275
8.4. Zagadnienia kontrolne	285
8.5. Zadania do samodzielnego rozwiązania	285
9. ANALIZA UKŁADÓW STEROWANIA W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI.....	290
9.1. Wprowadzenie	290
9.2. Odpowiedź częstotliwościowa układów z pętlą zamkniętą	291
9.3. Wskaźniki jakości definiowane w dziedzinie częstotliwości.....	293
9.4. Częstotliwościowe wskaźniki jakości prototypowego układu II rzędu ..	294
9.5. Wpływ dodatkowych zer i biegunów na charakterystyki częstotliwościowe prototypowego układu II rzędu	300
9.5.1. Dodatkowy biegun transmitancji w torze bezpośrednim	300
9.5.2. Dodanie bieguna do transmitancji układu zamkniętego	301
9.5.3. Dodanie zera do transmitancji układu zamkniętego	302
9.5.4. Dodatkowe zero transmitancji w torze bezpośrednim	303
9.6. Wykresy Bodego	304
9.6.1. Wykresy Bodego dla układów minimalnofazowych	306
9.6.2. Wykresy Bodego dla układów nieminimalnofazowych	317
9.6.3. Stabilność neutralna.....	318
9.7. Kryterium stabilności Nyquista.....	320
9.7.1. Problem stabilności	321

	Strona
9.7.2. Zasada argumentu.....	322
9.7.3. Kontur Nyquista	324
9.7.4. Wykres transmitancji pętli	324
9.8. Ogólne kryterium Nyquista dla transmitancji minimalnofazowej i nieminimalnofazowej	326
9.8.1. Układ z minimalnofazową transmitancją pętli	329
9.9. Stabilność liniowych układów sterowania z czasem opóźnienia	331
9.9.1. Trajektoria krytyczna	336
9.10. Stabilność względna: zapas wzmocnienia i zapas fazy	338
9.10.1. Zapas wzmocnienia	338
9.10.2. Zapas fazy.....	340
9.10.3. Zapas fazy w prototypowym układzie II rzędu	342
9.10.4. Zapasy wzmocnienia i fazy wyznaczane na podstawie charakterystyk częstotliwościowych Bodego	343
9.10.5. Charakterystyki Bodego układów z opóźnieniem.....	345
9.11. Zagadnienia kontrolne.....	353
9.12. Zadania do samodzielnego rozwiązania.....	354
10. PROJEKTOWANIE UKŁADÓW STEROWANIA.....	362
10.1. Wprowadzenie	362
10.1.1. Wymagania projektowe	362
10.1.2. Konfiguracje układów sterowania	364
10.1.3. Fundamentalne zasady projektowania	366
10.2. Cyfrowa implementacja algorytmów sterowania analogowego	368
10.3. Algorytm regulatora PID.....	369
10.3.1. Regulator proporcjonalny (P).....	369
10.3.2. Regulator proporcjonalno-całkujący (PI).....	370
10.3.3. Regulator proporcjonalno-różniczkujący (PD)	370
10.3.4. Regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (PID)	371
10.3.5. Ręczny dobór nastaw regulatora PID	372
10.3.6. Eksperymentalny dobór nastaw regulatora PID	373
10.3.7. Dobór nastaw z wykorzystaniem kryterium Routha.....	378
10.3.8. Konwersja ciągłego regulatora PID na postać cyfrową	381
10.4. Projektowanie układów sterowania metodą linii pierwiastkowych	385
10.4.1. Korektor przyspieszający fazę.....	386
10.4.2. Korektor opóźniający fazę	389
10.4.3. Korektor wycinający.....	396

	Strona
10.5. Projektowanie układów sterowania metodą charakterystyk częstotliwościowych	398
10.5.1. Korektor PD	399
10.5.2. Korektor przyśpieszający fazę.....	400
10.5.3. Korektor PI.....	408
10.5.4. Korektor opóźniający fazę	409
10.5.5. Korektor PID.....	415
10.6. Projektowanie układów sterowania metodą przestrzeni stanów	415
10.6.1. Znajdowanie prawa sterowania	417
10.6.2. Wprowadzanie sygnału zadanego	422
10.6.3. Sposoby wyboru położenia biegunów wzorcowych.....	424
10.6.4. Znajdowanie prawa sterowania przy użyciu funkcji MATLAB-a.....	430
10.6.5. Projektowanie estymatora	431
10.6.6. Estymatory zredukowanego rzędu.....	439
10.6.7. Wybór biegunów dla estymatora	442
10.6.8. Znajdowanie wzmocnień estymatora przy użyciu MATLAB-a	445
10.6.9. Korektor: połączenie sterowania i estymacji.....	447
10.6.10. Wprowadzenie sygnału zadanego do układu z estymatorem .	450
10.7. Sterowanie całkujące.....	453
10.8. Zagadnienia kontrolne.....	456
10.9. Zadania do samodzielnego rozwiązania.....	459
LITERATURA	481