

Spis treści

Przedmowa	7
1. Wprowadzenie do przedmiotu	11
1.1. Układ automatyki i pojęcia z nim związane	12
1.1.1. Jednokierunkowość przenoszenia sygnałów	13
1.1.2. Dynamika elementów	14
1.2. Klasyfikacja układów automatyki	15
2. Modele matematyczne układów	19
2.1. Równania różniczkowe	19
2.1.1. Wykorzystanie praw fizycznych i analogii	19
2.1.2. Wykorzystanie równań Lagrange'a	22
2.2. Równania stanu	25
2.3. Linearyzacja modeli	30
2.3.1. Linearyzacja równania różniczkowego n -tego rzędu	30
2.3.2. Linearyzacja równania stanu	33
2.4. Transmitancja operatorowa	34
2.4.1. Układ o jednym wejściu i jednym wyjściu	34
2.4.2. Odpowiedź impulsowa i skokowa	38
2.4.3. Układ o wielu wejściach i wielu wyjściach	39
2.5. Równania stanu a transmitancja	40
2.5.1. Reprezentacja równań stanu przez transmitancję	40
2.5.2. Reprezentacja transmitancji przez równanie stanu	42
2.5.3. Inna reprezentacja transmitancji przez równanie stanu	44
2.6. Charakterystyki częstotliwościowe	45
2.6.1. Charakterystyki amplitudowo-fazowe	47
2.6.2. Logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe	48
2.6.3. Układy minimalno-fazowe	51
3. Podstawowe elementy dynamiczne	53
3.1. Układy o parametrach skupionych	53
3.2. Układy o parametrach rozłożonych	59
3.2.1. Linia długa RC	59
3.2.2. Układ z opóźnieniem	62
4. Własności układów dynamicznych	65
4.1. Rozwiązanie liniowych, stacjonarnych równań stanu	65
4.2. Wyznaczanie macierzy podstawowej	67
4.2.1. Metoda przekształcenia odwrotnego Laplace'a	67

4.2.2.	Sprowadzanie do postaci kanonicznej	68
4.2.3.	Zmodyfikowana forma kanoniczna	70
4.3.	Sterowalność układów	71
4.3.1.	Określenie sterowalności	71
4.3.2.	Warunki sterowalności z wykorzystaniem macierzy A i B	72
4.4.	Obserwowalność układów	76
4.5.	Związek z opisem w postaci transmitancji	78
4.5.1.	Równanie stanu i transmitancja pełna	82
4.6.	Stabilność układów liniowych	83
4.6.1.	Opis w postaci równań stanu	83
4.6.2.	Odpowiedź układu stabilnego na wymuszenie	84
4.6.3.	Opis w postaci transmitancji	84
4.6.4.	Konieczne warunki stabilności	86
4.6.5.	Kryterium stabilności Hurwitza	87
5.	Struktura układów regulacji	91
5.1.	Przykłady układów regulacji	91
5.1.1.	Układ stabilizacji napięcia	91
5.1.2.	Układ stabilizacji poziomu	93
5.1.3.	Analiza wymiarów fizycznych współczynników modeli	96
5.2.	Opis układu zamkniętego	97
5.2.1.	Transmitancja układu zamkniętego	97
5.2.2.	Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych zamkniętego układu	99
5.3.	Własności układu ze sprzężeniem zwrotnym i ich wykorzystanie	102
5.3.1.	Tłumienie oddziaływania zakłóceń	102
5.3.2.	Kształtowanie własności dynamicznych	104
5.3.3.	Linearyzacja charakterystyk elementów	105
5.4.	Układy otwarte	106
5.5.	Układy zamknięto-otwarte	109
5.6.	Układy kaskadowe	111
5.7.	Przekształcanie schematów blokowych	114
6.	Stabilność układów zamkniętych	117
6.1.	Równanie charakterystyczne zamkniętego układu	118
6.1.1.	Zastosowanie kryterium Hurwitza	118
6.2.	Kryterium Nyquista	123
6.2.1.	Twierdzenie Cauchy'ego o przyroście argumentu	123
6.2.2.	Przypadek, gdy otwarty układ jest stabilny	124
6.2.3.	Przypadek biegunów zerowych transmitancji $K(s)$	127
6.2.4.	Przypadek, gdy otwarty układ jest niestabilny	129
6.3.	Obliczeniowe stosowanie kryterium Nyquista	130
6.4.	Badanie stabilności przy wykorzystaniu charakterystyk logarytmicznych	132
6.4.1.	Przypadek charakterystyk częstotliwościowych nieregularnych	133
6.5.	Stabilność układów z opóźnieniem	134
6.5.1.	Równanie charakterystyczne układu zamkniętego	134
6.5.2.	Obliczeniowe stosowanie kryterium Nyquista dla układów z opóźnieniem	137

7. Ocena jakości przebiegów	143
7.1. Bezpośrednie wskaźniki jakości przebiegów	143
7.2. Analiza stanu ustalonego	145
7.2.1. Układy statyczne i astatyczne	146
7.2.2. Przypadek, gdy wymuszeniem jest wartość zadana	146
7.2.3. Przypadek, gdy wymuszeniem jest zakłócenie	147
7.2.4. Układy astatyczne wyższego rzędu	150
7.2.5. Dokładność układów statycznych	151
7.2.6. Uwzględnienie nieliniowości	152
7.3. Metody bazujące na rozkładzie pierwiastków	154
7.3.1. Stopień stabilności	154
7.3.2. Wyznaczanie stopnia stabilności	155
7.3.3. Orientacyjne określenie czasu regulacji	156
7.3.4. Stopień oscylacyjności	157
7.3.5. Metoda linii pierwiastkowych	158
7.3.6. Wyznaczanie pierwiastków rzeczywistych	159
7.3.7. Wyznaczanie pierwiastków zespolonych	159
7.4. Metody bazujące na wskaźnikach całkowych	160
7.4.1. Liniowe wskaźniki całkowite	160
7.4.2. Kwadratowe wskaźniki całkowite	162
7.4.3. Optymalne nastawy parametrów regulatora	166
7.4.4. Zmodyfikowane wskaźniki kwadratowe	168
7.4.5. Uwagi o wskaźnikach kwadratowych	168
7.5. Metody częstotliwościowe	170
7.5.1. Warunek śledzenia z zadaną dokładnością przy wymuszeniu sinusoidalnym	170
7.5.2. Warunek tłumienia oddziaływania zakłóceń sinusoidalnych	171
7.5.3. Kryterium maksimum modułu	174
7.5.4. Zapas amplitudy i zapas fazy	178
8. Elementy korekcyjne i regulatory	181
8.1. Stabilizacja przy wykorzystaniu elementów różniczkujących i całkujących	181
8.2. Przykłady elementów korekcyjnych	183
8.2.1. Korektor proporcjonalno-różniczkujący (PD)	183
8.2.2. Korektor proporcjonalno-całkujący (PI)	184
8.2.3. Korektor proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (PID)	185
8.3. Zalecenia przy doborze korektorów	186
8.4. Przykład doboru korektora	188
8.5. Regulatory	191
8.6. Realizacja układowa regulatorów	194
8.7. Strojenie parametrów regulatora	195
9. Układy o wielu zmiennych regulowanych	199
9.1. Opis układów za pomocą transmitancji macierzowej	199
9.1.1. Połączenie szeregowe	200
9.1.2. Połączenie równoległe	201
9.1.3. Sprzężenie zwrotne	201
9.2. Opis zamkniętego układu regulacji	202
9.3. Analiza stabilności zamkniętego układu	204

9.4. Analiza stabilności układu regulacji dwóch zmiennych	210
9.5. Uwzględnienie zmiany przyporządkowania w opisie układu	215
9.6. Zastosowanie opisu w przestrzeni stanu	217
9.6.1. Sterowanie modalne	222
9.7. Zastosowanie metod częstotliwościowych	225
9.7.1. Metoda transmitancji charakterystycznych	226
9.7.2. Transmitancje charakterystyczne zamkniętego układu	228
9.7.3. Zastosowanie do analizy układu	230
9.7.4. Metoda zamykania kolejnych pętli	232
9.7.5. Projektowanie regulatorów metodą zamykania kolejnych pętli	234
10. Układy o działaniu dyskretnym - w czasie	245
10.1. Funkcje dyskretne - w czasie i transformacja $\mathcal{Z}$	245
10.1.1. Własności transformacji $\mathcal{Z}$	248
10.1.2. Transformacja odwrotna $\mathcal{Z}^{-1}$	251
10.2. Elementy i układy z próbkowaniem	253
10.3. Transmitancja dyskretna	257
10.3.1. Przypadek impulsatora liniowego o dowolnym kształcie impulsów	260
10.3.2. Transmitancja układu z ekstrapolatorem	261
10.3.3. Uwagi o transmitancji dyskretniej	262
10.4. Opis układów zamkniętych	263
10.5. Stabilność układów zamkniętych	266
10.5.1. Zastosowanie kryterium Hurwitza	269
10.5.2. Przykład analizy stabilności układu	270
10.6. Zastosowanie metod częstotliwościowych	272
10.6.1. Analiza efektu próbkowania	272
10.6.2. Zastosowanie do analizy stabilności	275
10.6.3. Cyfrowa realizacja regulatorów PID	276
10.6.4. Przypadek małych okresów próbkowania	279
10.6.5. Modele przybliżone	282
10.6.6. Projektowanie regulatora dyskretnego	284
10.6.7. Układ wielowymiarowy z różnymi okresami próbkowania	286
10.6.8. Istnienie transmitancji	288
10.6.9. Projektowanie dyskretnych układów wielowymiarowych	289
10.6.10. Uwagi o niektórych programach	292
Literatura	295
Skorowidz	299