

SPIS TREŚCI

WSTĘP	7
1. PODSTAWOWE POJĘCIA REGULACJI	9
1.1. Układ regulacji	9
1.2. Charakterystyki statyczne elementów automatyki	12
1.3. Charakterystyki czasowe	13
1.4. Podstawowe równania – analogie systemów	13
1.4.1. Elementy rozpraszające energię	14
1.4.2. Elementy magazynujące energię potencjalną	18
1.4.3. Elementy magazynujące energię kinetyczną	21
2. DYNAMIKA UKŁADÓW LINIOWYCH	25
2.1. Zwyczajne równania różniczkowe	25
2.2. Transmitancja operatorowa	26
2.3. Łączenie elementów automatyki	28
2.3.1. Połączenie szeregowo elementów	28
2.3.2. Połączenie równoległe elementów	29
2.3.3. Układ z ujemnym sprzężeniem zwrotnym	30
2.3.4. Układ z dodatnim sprzężeniem zwrotnym	30
2.3.5. Przetworzenie węzłów zaczepowych i sumacyjnych	31
2.3.6. Zadania: schematy blokowe	32
2.4. Charakterystyki czasowe	36
2.5. Zależności między charakterystykami czasowymi	36
2.6. Charakterystyki częstotliwościowe	38
2.7. Wyprowadzenie równań wiążących transmitancję operatorową z charakterystyką częstotliwościową	42
3. ELEMENTY AUTOMATYKI	47
3.1. Podział układu opisanego transmitancją na człony elementarne	47
3.2. Element całkujący	50
3.3. Element inercyjny pierwszego rzędu	57
3.4. Element proporcjonalny	64
3.5. Element inercyjny drugiego rzędu	66

3.6. Element oscylacyjny	76
3.7. Elementy inercyjne wyższego rzędu	85
3.8. Element różniczkujący	88
3.9. Element opóźniający	91
4. REGULATORY	95
4.1. Rodzaje regulatorów	95
4.2. Charakterystyki regulatorów o działaniu ciągłym	95
4.2.1. Regulator proporcjonalny P	95
4.2.2. Regulator całkujący I	96
4.2.3. Regulator proporcjonalno-całkujący PI	98
4.2.4. Regulator proporcjonalno-różniczkujący PD	99
4.2.5. Regulator proporcjonalno-całkujący różniczkujący PID	100
4.3. Zasady konstrukcji regulatorów analogowych	102
4.4. Regulatory bezpośredniego działania	106
4.5. Regulatory dwupołożeniowe	105
4.6. Regulatory krokowe	109
4.7. Regulatory cyfrowe, sterowniki	111
5. STABILNOŚĆ UKŁADU REGULACJI	113
5.1. Określenie stabilności układu regulacji	113
5.2. Metody badania stabilności układów regulacji	115
5.3. Stabilność układów liniowych	117
5.4. Kryterium stabilności Hurwitza	120
5.5. Kryterium stabilności Nyquista	123
5.5.1. Definicja kryterium Nyquista	123
5.5.2. Badanie stabilności układu obiekt inercyjny czwartego rzędu, regulator P	125
5.5.3. Badanie stabilności układu obiekt inercyjny 1. rzędu z opóźnieniem, regulator P	127
5.5.4. Badanie stabilności układu obiekt całkujący, regulator P	128
5.5.5. Badanie stabilności układu obiekt całkujący z inercją, regulator P	130
5.5.6. Badanie stabilności układu obiekt całkujący, regulator całkujący I	132

6. OBLICZANIE PRZEBIEGU REGULACJI	135
6.1. Różniczkowe równania stanu	135
6.2. Metody numerycznego rozwiązywania różniczkowych równań stanu	139
6.2.1. Metoda numeryczna Eulera (prostokątów)	141
6.2.2. Metoda numeryczna Rungego-Kutty	142
6.3. Przykład rozwiązywania metodą numeryczną Eulera i metodą Rungego-Kutty równań obiektu niestabilnego	143
6.4. Przykład rozwiązywania metodą numeryczną Eulera równania opisującego obiekt stabilny	151
6.5. Tworzenie modeli układów dynamicznych za pomocą pakietu SIMULINK w programie MATLAB	153
7. DOKŁADNOŚĆ REGULACJI	155
7.1. Wskaźniki jakości regulacji wynikające z charakterystyki czasowej	155
7.2. Obliczanie statycznej odchyłki regulacji	158
7.2.1. Przykład obliczania statycznej odchyłki regulacji w układzie zawierającym obiekt stabilny i regulator proporcjonalny P	159
7.2.2. Przykład obliczania statycznej odchyłki regulacji w układzie zawierającym obiekt stabilny i regulator całkujący I	160
7.3. Wskaźniki jakości regulacji wynikające z charakterystyki częstotliwościowej zamkniętego układu regulacji	162
7.3.1. Pasma przenoszenia	162
7.3.2. Wskaźniki regulacji	164
7.4. Porównanie przebiegów regulacji dla różnych typów regulatorów	166
7.5. Błąd prędkościowy regulacji nadsztywnej	167
7.6. Dobór nastaw parametrów regulatora	170
7.6.1. Wyznaczanie przybliżonych parametrów obiektu statycznego z jego charakterystyki skokowej	172
7.6.2. Wyznaczanie przybliżonych parametrów obiektu astatycznego z jego charakterystyki skokowej	174
7.6.3. Dobór nastaw regulatora PID za pomocą wzorów Zieglera-Nicholsa	175

8. PRZEKSZTAŁCENIE FOURIERA	177
8.1. Szereg Fouriera funkcji okresowej	177
8.2. Zespolony szereg Fouriera	178
8.3. Przekształcenie Fouriera	178
9. PRZEKSZTAŁCENIE LAPLACE’A	181
9.1. Definicja przekształcenia Laplace’a	181
9.2. Przykłady obliczania transformat Laplace’a	181
9.2.1. Transformata funkcji wykładniczej	181
9.2.2. Funkcja skokowa jednostkowa $1(t)$.	182
9.2.3. Funkcja skokowa jednostkowa przesunięta w czasie $1(t - T)$.	183
9.2.4. Funkcja impulsowa $\delta(t)$ Diraca	184
9.3. Podstawowe własności przekształcenia Laplace’a	185
9.3.1. Liniowość	185
9.3.2. Transformata całki	185
9.3.3. Transformata pochodnej	186
9.3.4. Mnożenie i dzielenie przez t funkcji $f(t)$	187
9.3.5. Twierdzenie o przesunięciu w dziedzinie zespolonej	187
9.3.6. Twierdzenie o przesunięciu w dziedzinie rzeczywistej	187
9.3.7. Twierdzenie o zmianie skali	187
9.3.8. Twierdzenie o wartościach granicznych	188
9.3.9. Splot funkcji	188
9.3.10. Transformata splotu funkcji	189
9.4. Rozkład funkcji operatorowej na ułamki proste	189
9.5. Związek między transformatami Laplace’a i Fouriera	190
9.6. Tabela transformat Laplace’a dla wybranych funkcji	191
LITERATURA	193