
SPIS TREŚCI

Przedmowa	8
1. MODEL OBIEKTU I WYMAGANIA PROJEKTOWE	9
1.1. Procedura projektowania	9
1.1.1. Problem projektowania regulatora	9
1.2. Modele obiektu	10
1.2.1. Podstawowe własności modeli obiektów	11
1.2.2. Wymagania dotyczące układu zamkniętego	12
1.2.3. Prosty model układu zamkniętego	13
1.3. Podsumowanie	15
1.4. Wydruk do rozdziału 1	15
Literatura	16
2. PROJEKTOWANIE REGULATORÓW JAKO POŁĄCZENIA CZŁONÓW KOREKCYJ- NYCH PIERWSZEGO RZĘDU	17
2.1. Podstawowe wiadomości o członach korekcyjnych	17
2.2. Projekt regulatora	19
2.3. Symulacyjne badanie odporności regulatora	22
2.4. Podsumowanie	24
2.5. Przykładowy wydruk	24
Literatura	25
3. PROJEKTOWANIE REGULATORÓW METODĄ PRZESUWANIA BIEGUNÓW	26
3.1. Metoda projektowania regulatora od stanu	26
3.1.1. Rozwiązanie numeryczne problemu	28
3.1.2. Projekt dla podwójnego integratora	28
3.2. Regulator z dodatkową pętlą sprzężenia zwrotnego	30
3.2.1. Regulator dla podwójnego integratora	31
3.3. Regulator z obserwatorem stanu	32
3.3.1. Przykład dla podwójnego integratora	34
3.4. Symulacyjne badanie odporności układu	37
3.5. Podsumowanie	39
3.6. Przykładowy wydruk	39
Literatura	41
4. PROJEKTOWANIE REGULATORÓW Z KRYTERIUM LINIOWO-KWADRATOWYM (LQ) I KRYTERIUM H_2	42
4.1. Podstawowe zależności dla metody LQ	42
4.1.1. Numeryczna metoda rozwiązywania równania Riccatiego	44

4.1.2.	Projekt regulatora metodą LQ dla podwójnego integratora	45
4.1.3.	Projekt regulatora metodą LQ dla podwójnego integratora z dodatkową pętlą sprzężenia	46
4.1.4.	Projekt regulatora metodą LQ dla podwójnego integratora z obserwatorem	48
4.2.	Podstawy projektu regulatora z minimalizacją normy H_2	50
4.2.1.	Definicja normy H_2	50
4.2.2.	Rozwiązanie problemu minimalizacji normy H_2	51
4.2.3.	Projekt regulatora dla podwójnego integratora	53
4.3.	Podsumowanie	56
4.4.	Przykładowe wydruki	57
	Literatura	58
5.	PROJEKTOWANIE REGULATORÓW METODĄ WIELOMIANOWĄ	59
5.1.	Sformułowanie problemu projektowania	59
5.1.1.	Rozwiązanie równania diofantycznego	61
5.1.2.	Regulator dla podwójnego integratora (dziedzina ciągła)	63
5.1.3.	Regulator dla podwójnego integratora (dziedzina dyskretna)	65
5.2.	Modyfikacje metody wielomianowej	68
5.2.1.	Regulator $C(s)$ ściśle właściwy	68
5.2.2.	Zbiór wszystkich regulatorów stabilizujących	69
5.2.3.	Projekt regulatora z kwadratowym kryterium jakości	70
5.2.4.	Uwzględnienie akcji całkującej w projekcie regulatora	73
5.2.5.	Regulator drugiego stopnia jako regulator PID	73
5.2.6.	Układ zamknięty z regulatorem szeregowym	74
5.3.	Podsumowanie	75
5.4.	Wybrany wydruk	75
	Literatura	76
6.	WPROWADZENIE DO OPTIMALIZACYJNEJ ANALIZY I SYNTEZY REGULATORÓW	77
6.1.	Właściwe postawienie zagadnienia sprzężenia zwrotnego	77
6.2.	Normy sygnałów	79
6.3.	Norma H_∞ dla układów	80
6.4.	Norma H_2 dla układów	81
6.5.	Sformułowanie problemu optymalizacyjnego	82
6.6.	Wybór sygnałów w i sygnałów z	84
6.7.	Rząd regulatora i ograniczenia strukturalne	85
6.8.	Właściwe postawienie zagadnienia projektu optymalizacyjnego	86
6.8.1.	Stabilizacja	86
6.8.2.	Warunki na macierze D_{ik}	87
6.8.3.	Nieosobliwość sterowania	87
6.8.4.	Nieosobliwość pomiarów	88
6.9.	Podsumowanie	88
	Literatura	88
7.	WPROWADZENIE DO LINIOWYCH NIERÓWNOŚCI MACIERZOWYCH W TEORII STEROWANIA	89
7.1.	Definicja i podstawowe własności LMI	89
7.1.1.	Definicja	89
7.1.2.	Wypukłość	90

7.1.3. Niejednoznaczność LMI	90
7.1.4. Składanie LMI	90
7.1.5. Układ nierówności liniowych jako LMI	91
7.1.6. Uzupełnienie Schura	91
7.1.7. Największa wartość singularna	91
7.1.8. Algebraiczna nierówność Riccatiego	92
7.2. Typowe zagadnienia związane z warunkami LMI	92
7.3. Stabilność układów liniowych	93
7.3.1. Stabilność układu z dodatkowymi ograniczeniami	94
7.3.2. Stabilność układów nieliniowych i układów zmiennych w czasie	95
7.4. Podstawowe narzędzia do analizy i syntezy układów sterowania	96
7.4.1. Lemat o ograniczeniu w dziedzinie rzeczywistej	96
7.4.2. Lemat o dodatniości w dziedzinie rzeczywistej	97
7.4.3. S-procedura	98
7.4.4. Wyznaczenie normy H_∞	99
7.4.5. Wyznaczenie normy H_2	100
7.4.6. Lemat o eliminacji	100
7.5. Synteza wielokryterialnego regulatora od stanu	101
7.5.1. Warunek dotyczący normy H_∞	102
7.5.2. Warunek dotyczący normy H_2	103
7.5.3. Warunek dotyczący umieszczenia biegunów w zadanym zbiorze	103
7.5.4. Łączne warunki LMI	104
7.5.5. Typowa procedura projektowania	105
7.6. Podsumowanie i możliwe (istniejące) zastosowania LMI	105
Literatura	106
8. OPROGRAMOWANIE DO ROZWIĄZYWANIA ZADAŃ OPTIMALIZACJI WYPUKŁEJ W TEORII STEROWANIA	107
8.1. Typowe zagadnienia związane z warunkami LMI i ich reprezentacja w programach YALMIP i Matlab	108
8.1.1. Zagadnienie istnienia (ang. <i>feasibility</i>)	108
8.1.2. Zagadnienie minimalizacji funkcji liniowej przy ograniczeniu LMI	112
8.1.3. Zagadnienie największej uogólnionej wartości własnej	114
8.2. Podsumowanie	118
Literatura	118
9. ANALIZA ODPORNOŚCI UKŁADÓW STEROWANIA	119
9.1. Warunek LMI określający odporną stabilność układu	119
9.2. Analiza układu regulacji zaprojektowanego za pomocą członów korekcyjnych	122
9.3. Podsumowanie	126
9.4. Wydruk badania stabilnej odporności układu sterowania	126
Literatura	128
10. PROJEKTOWANIE REGULATORÓW STATYCZNYCH, OD STANU	129
10.1. Sformułowanie problemu projektowania jako zadania optymalizacyjnego	129
10.1.1. Warunki LMI	130
10.1.2. Opis układu zamkniętego	132
10.2. Projekt regulatora statycznego od stanu (ograniczony obszar położenia biegunów układu zamkniętego oraz minimalizacja norm H_2 i H_∞)	132
10.2.1. Metodyka projektu	134
10.3. Zależności projektowe dla statycznego regulatora od stanu z dodatkowym integratorem	138

10.4.	Projekt regulatora od stanu w pętli z dodatkowym integratorem	140
10.4.1.	Regulator dla obiektu o niepewnych parametrach	140
10.4.2.	Regulator dla obiektu z pominiętą dynamiką	143
10.5.	Zależności dla regulatora od stanu z pominiętą dynamiką bez wyspecyfikowanej struktury	146
10.5.1.	Projekt regulatora od stanu z pominiętą dynamiką bez wyspecyfikowanej struktury	148
10.6.	Podsumowanie	151
10.7.	Przykładowy wydruk	151
	Literatura	153
11.	PROJEKTOWANIE REGULATORÓW DYNAMICZNYCH	154
11.1.	Sformułowanie problemu projektowania jako zadania optymalizacyjnego	154
11.1.1.	Podstawienia i warunki LMI	155
11.1.2.	Ustalenie macierzy regulatora	157
11.1.3.	Opis układu zamkniętego	158
11.2.	Regulator w pętli sprzężenia zwrotnego do śledzenia wartości zadanej	159
11.3.	Regulator w pętli sprzężenia zwrotnego dla śledzenia wartości zadanej i tłumienia zakłóceń	161
11.4.	Regulator szeregowy do śledzenia wartości zadanej	165
11.5.	Regulator szeregowy do śledzenia wartości zadanej i tłumienia zakłóceń	168
11.6.	Podsumowanie	171
11.7.	Przykładowy wydruk	172
	Literatura	174
12.	PROJEKTOWANIE REGULATORÓW METODĄ KSZTAŁTOWANIA CHARAKTERYSTYKI AMPLITUDOWEJ	175
12.1.	Uzasadnienie teoretyczne metody kształtowania charakterystyki amplitudowej	175
12.2.	Sformułowanie zadania optymalizacyjnego	177
12.3.	Projekt regulatora dla podwójnego integratora (obiekt nominalny)	180
12.4.	Projekt regulatora dla podwójnego integratora (obiekt z pominiętymi dynamikami)	187
12.5.	Podsumowanie	191
12.6.	Przykładowy wydruk	191
	Literatura	194
13.	PROJEKTOWANIE REGULATORÓW DYSKRETNYCH DLA OBIEKTÓW DYSKRETNYCH	195
13.1.	Warunki stabilności układów dyskretnych	196
13.2.	Normy transmitancji dyskretnych	198
13.2.1.	Norma H_2	199
13.2.2.	Norma H_∞	199
13.2.3.	Przykład oszacowania norm	199
13.3.	Regulator statyczny, od stanu	200
13.3.1.	Przykład projektu regulatora od stanu	202
13.3.2.	Przykład projektu regulatora od stanu z dodatkowym integratorem	205
13.4.	Regulator dynamiczny od wyjścia	207
13.4.1.	Przykład projektu regulatora w sprzężeniu zwrotnym	210
13.4.2.	Przykład projektu regulatora szeregowego	212
13.5.	Podsumowanie	215
13.6.	Przykładowy wydruk	215
	Literatura	218

14. PROJEKTOWANIE REGULATORA PREDYKCYJNEGO Z MODELEM	219
14.1. Wyznaczenie prawa sterowania dla modelu liniowego z kwadratowym wskaźnikiem jakości	219
14.2. Przykłady realizacji sterowania predykcyjnego z modelem	223
14.2.1. Regulator LQR z nasyceniem sygnału sterowania	223
14.2.2. Regulator predykcyjny z modelem bez nasycenia sygnału sterującego	224
14.2.3. Regulator predykcyjny z modelem z nasyceniem sygnału sterującego	224
14.3. Podsumowanie	226
14.4. Przykładowy wydruk	226
Literatura	228