

Spis treści

1. Wstęp	1
2. Elementy algebry liniowej	2
2.1. Odwzorowania liniowe i macierze	2
2.2. Zagadnienie własne.	4
2.3. Kanoniczna reprezentacja jordanowska	6
2.4. Rzeczywista postać Jordana macierzy rzeczywistej	11
2.5. Rachunek funkcyjny dla macierzy	17
3. Modele obiektów sterowania	22
3.1. Elektryczny filtr $RC-RC-RC$	22
3.2. Sterowany dwójnik elektryczny $RLCGM$	23
3.3. Elektryczna linia transmisyjna $\mathcal{RLCG}$	26
3.3.1. Równania elektrycznej linii transmisyjnej $\mathcal{RLCG}$	26
3.3.2. Linia transmisyjna $\mathcal{RLCG}$ bez zniekształceń jako obiekt sterowania	27
3.3.3. Linia transmisyjna $\mathcal{RC}$ jako obiekt sterowania	29
3.4. Zbiornik o przepływie ciągłym	30
3.5. Wahadło odwrócone	32
4. Rozwiązania liniowych równań stanu	35
4.1. Analiza układu jednorodnego	35
4.2. Wyznaczanie macierzy fundamentalnej	36
4.2.1. Metoda reprezentacji jordanowskiej	36
4.2.2. Metoda reprezentacji spektralnej	37
4.2.3. Przypadek rzeczywistej postaci jordanowskiej	37
4.2.4. Metoda baz Riesza	40
4.3. Analiza układu niejednorodnego	41
4.3.1. Formuła wariacji stałych dla układu niejednorodnego	41
4.3.2. Sterowalność i gramian sterowalności	43
4.3.3. Wyznaczenie wyjścia.	48
4.3.4. Obserwowalność i gramian obserwowalności	50
5. Transmitancja liniowego układu sterowania.	53
5.1. Opis układu sterowania w dziedzinie częstotliwości	53
5.2. Wyznaczanie rezolwenty i transmitancji.	54
5.3. Przykłady transmitancji układów o parametrach rozłożonych	66
5.4. Zagadnienie realizacji transmitancji	66
5.4.1. Realizacja transmitancji skalarnej	67

5.4.2. Realizacja transmitancji macierzowej	73
5.4.3. Bezpośrednie wyznaczenie minimalnej realizacji transmitancji macierzowej	75
6. Postać kanoniczna Kalmana	82
7. Zamknięte układy sterowania	92
7.1. Równania stanu układów zamkniętych z regulatorami konwencjonalnymi	92
7.1.1. Przypadek regulatora PD	92
7.1.2. Przypadek regulatora PID	94
7.2. Twierdzenie o rozmieszczeniu widma	95
8. Stabilność układów liniowych	101
8.1. Własności asymptotyczne rozwiązań	101
8.2. Algebraiczne kryteria stabilności	104
8.2.1. Kryterium Hurwitza	105
8.2.2. Kryterium Routha	105
8.3. Obszar stabilności w przestrzeni parametrów.	109
8.3.1. Ciągła zależność zer wielomianów od jego współczynników	109
8.3.2. Wyznaczanie obszarów stabilności w przestrzeni parametrów	114
8.4. Częstotliwościowe kryteria stabilności układów liniowych	115
8.4.1. Kryterium Michajłowa	115
8.4.2. Kryterium Nyquista	119
8.4.3. Kryterium Nyquista w przypadku pary sprzężonej biegunów na osi urojonej	124
8.4.4. Modyfikacja kryterium Nyquista dla układu SISO z regulatorem P	127
8.4.5. Kryterium Nyquista dla układu SISO z opóźnieniem	129
8.5. Kryterium stabilności oparte na macierzowym równaniu Lapunowa.	135
8.6. Stabilność, a sprowadzalność do zera za pomocą sterowań ograniczonych	146
8.7. Stabilizowalność i wykrywalność	147
9. Wprowadzenie do teorii układów dyskretnych.	148
9.1. Rozwiązywanie liniowych dyskretnych równań stanu	148
9.2. Transformacja $\mathcal{Z}$	149
9.3. Odwrotna transformacja $\mathcal{Z}$	152
9.4. Analiza częstotliwościowa	152
9.5. Potęgowa stabilność	153
9.5.1. Kryterium algebraiczne potęgowej stabilności	154
9.5.2. Kryterium wykorzystujące dyskretnie macierzowe równaniu Lapunowa	155
9.6. Zastosowanie do badania schematów różnicowych	156
9.7. Dyskretnie układy sterowania	160
9.7.1. Układ otwarty z impulsatorem idealnym	160
9.7.2. Układ otwarty z modulatorem amplitudy	162
9.7.3. Przykład analizy układu zamkniętego	165
9.7.4. Układ z modulatorem szerokości impulsu.	168

10. Podstawy teorii optymalizacji.	171
10.1. Problem minimalizacji funkcjonału	171
10.2. Warunki wystarczające: twierdzenie Weierstrassa	171
10.3. Minimalizacja funkcjonałów w przestrzeniach Hilberta i Banacha	172
10.3.1. Przypadek przestrzeni Hilberta	172
10.3.2. Przypadek przestrzeni Banacha	174
11. Przestrzenie i operatory ograniczone	175
11.1. Typowe przestrzenie stanu	175
11.2. Typowe operatory	179
12. Minimalizacja funkcjonałów kwadratowych	184
12.1. Zadanie bez ograniczeń.	184
12.1.1. Dyskusja warunków optymalności	184
12.2. Uwagi o zadaniach z ograniczeniami	185
12.3. Przykład: problem lq	187
13. Warunki konieczne: twierdzenie Fermata	189
14. Optymalizacja parametryczna.	197
14.1. Wyznaczanie $L^2(0, \infty; \mathbb{R}^m)$ - normy wyjścia.	197
14.2. Przykłady optymalizacji parametrycznej normy energetycznej	197
14.2.1. Optymalizacja parametryczna układu z konwencjonalnym regulatorem P.	197
14.2.2. Optymalizacja parametryczna układu regulacji z regulatorem PI	201
15. Aproksymacja odpowiedzi impulsowej	207
15.1. Sformułowanie problemu	207
15.2. Warunki wystarczające optymalności	207
15.3. Warunki konieczne optymalności.	209
16. Stabilność nieliniowych układów sterowania.	213
17. Analiza absolutnej stabilności metodą Lapunowa	217
17.1. Definicja i konstrukcja funkcjonału Lapunowa	217
17.2. Funkcje dodatnio rzeczywiste	220
17.3. Dyskusja rozwiązalności układu (17.6)	221
17.3.1. Przypadek układu kanonicznego	221
17.3.2. Przypadek oryginalnego układu rozwiązujących równań Lurie	224
18. Optymalna estymata obszaru atrakcji zerowego punktu równowagi	234
18.1. Przykład konstrukcji kwadratowego funkcjonału Lapunowa	235
18.2. Uogólnienia	241
19. Stabilność nieliniowych dyskretnych układów sterowania.	244
19.1. Stabilność – fakty ogólne	244
19.2. Forma kwadratowa jako funkcjonał Lapunowa dla dyskretnego układu Lurie	245

20. Warunki konieczne Karusha–Kuhna–Tuckera	251
20.1. Twierdzenie Karusha–Kuhna–Tuckera	251
20.2. Twierdzenie o punkcie siodłowym funkcjonału Lagrange’a	252
20.3. Zastosowanie warunków KKT w zadaniach minimalizacji	253
20.3.1. Zadanie 1	253
20.3.2. Zadanie 2	255
20.3.3. Podsumowanie	257
20.4. Ćwiczenia	257
21. Elementy analizy wypukłej	263
21.1. Podstawowe pojęcia analizy wypukłej	263
21.2. Relacja między wypukłością a ciągłością	268
21.3. Minimalizacja funkcjonałów wypukłych	268
21.3.1. Subgradient – definicja i interpretacja geometryczna	268
21.3.2. Twierdzenie o minimalizacji funkcjonału wypukłego na zbiorze wypukłym	271
21.3.3. Wypukłe funkcjonały Lapunowa	273
21.3.4. Przykład	273
21.4. Charakteryzacje wypukłości funkcjonałów różniczkowalnych	275
22. Przykłady minimalizacji funkcjonałów na przestrzeniach funkcyjnych	277
22.1. Rozwiązanie alternatywne problemu (15.1)	277
22.2. Problem brachistochrony	278
22.3. Rozwiązanie problemu brachistochrony	279
22.3.1. Konweksyfikacja problemu	279
22.3.2. Przestrzeń stanu i zbiór dopuszczalny	280
22.3.3. Nierówność wariacyjna i równanie Eulera–Lagrange’a	281
22.3.4. Rozwiązywanie równań Eulera–Lagrange’a metodą Beltramiego	282
22.4. Problem minimalnej powierzchni obrotowej	285
22.5. Rozwiązanie problemu minimalnej powierzchni obrotowej	286
22.5.1. Przestrzeń stanu, własności funkcjonału celu i zbioru dopuszczanego	286
22.5.2. Warunki konieczne	288
22.5.3. Alternatywne warunki konieczne	290
22.5.4. Dyskusja równania (22.30)	290
22.5.5. Rozwiązanie Goldschmidta	293
22.5.6. Warunki dostateczne optymalności oparte na twierdzeniu Weierstrassa	295
23. Problem liniowo-kwadratowy	305
23.1. Sformułowanie problemu	305
23.2. Rozwiązanie problemu lq	306
23.3. Systemy stabilizowalne	310

24. Zbiór osiągalności przy ograniczeniach na sterowanie	317
24.1. Zbiór osiągalności i jego własności	317
24.2. Wyznaczanie zbioru osiągalności metodą hiperpłaszczyzn podpierających . . .	318
24.3. Zasada maksimum dla układu liniowego	320
24.4. Przypadek $p = \infty$ oraz zbiór Ω jest kulą	321
24.4.1. Przypadek sterowania skalarnego	321
24.4.2. Przypadek sterowania wektorowego	322
25. Zasada maksimum	325
25.1. Sterowanie według kryterium minimalnego zużycia paliwa	332
25.2. Sterowanie minimalnoczasowe.	334
25.3. Problem l_q ze skończonym horyzontem sterowania.	336
25.3.1. Warunki dostateczne	336
25.3.2. Warunki konieczne – zastosowanie zasady maksimum	336
25.3.3. Synteza regulatora liniowego	337
25.3.4. Krótka dyskusja	339
25.4. Dwuwymiarowe regulatory czasooptymalne	342
26. Układy o parametrach rozłożonych	350
26.1. Modele dynamiki układów o parametrach rozłożonych – przykłady	350
26.2. Modele dynamiki układów o parametrach rozłożonych – podsumowanie	360
26.3. Półgrupy i operatory stanu	360
26.4. Dopuszczalne operatory obserwacji	364
26.5. Dopuszczalne czynnikiowe operatory sterowania	367
26.6. Reprezentacja stanu	367
26.7. Reprezentacja wyjścia	368
26.8. Wykładnicza stabilność przy liniowych sprzężeniach zwrotnych	368
26.8.1. Operatorowy opis układu zamkniętego	369
26.8.2. Abstrakcyjny model różniczkowy	370
26.8.3. Perturbacje generatorów C_0 -półgrup	370
26.9. Problem l_q dla układów o parametrach rozłożonych	370
26.10. Przyrostowe kryterium koła	373
27. Dodatki	394
27.1. Dowód uwagi 11.2	394
27.2. Wyprowadzenie wzoru (15.10) metodą szeregu geometrycznego	394
Bibliografia	397
Indeks	401