



**Instytut Badań Systemowych  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

**Piotr Suchomski**

**SYNTEZA ALGORYTMÓW  
ODPORNEGO STEROWANIA  
W CZASIE DYSKRETNYM**





**Piotr Suchomski**

**SYNTEZA ALGORYTMÓW  
ODPORNEGO STEROWANIA  
W CZASIE DYSKRETNYM**

INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH • POLSKIEJ AKADEMII NAUK

**Seria: BADANIA SYSTEMOWE**

**tom 38**

---

**Redaktor naukowy:**

**Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum**

**Warszawa 2004**

**Piotr Suchomski**

**SYNTEZA ALGORYTMÓW  
ODPORNEGO STEROWANIA  
W CZASIE DYSKRETNYM**

Publikację opiniowali do druku:

Prof. dr hab. inż. Mikołaj Busłowicz

Doc. dr hab. inż. Piotr Kulczyki (prof. PK)

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN

Warszawa 2004

Wydawca: Instytut Badań Systemowych PAN

ul. Newelska 6 01-447 Warszawa

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw

tel. 837-68-22

email: biblioteka@ibspan.waw.pl

**ISBN 83-85847-94-4**

**ISSN 0208-8029**

# Indeks

- $J$ -bezstratna faktoryzacja, 161
- $J$ -bezstratna funkcja, 157, 159, 160
- $J$ -bezstratny system, 156
- $J$ -unitarna funkcja, 157, 159
- $Q$ -parametr, 57, 58, 202
- algorytm
  - 2.1, 36
  - 4.1, 125
  - 6.1, 230
  - 6.2, 233
  - Bartelsa–Stewart, 124
- antycypacyjna filtracja, 91
- aproxymacja Padé, 103, 104
- bezstratna funkcja, 156
- centralne rozwiązanie, 179, 183, 200, 227, 229
- charakterystyka niepewności modelu
  - addytywna, 53, 65
  - multiplikatywna, 53
- ciągłe równanie Riccatiego, 143
- diofantyczna baza
  - druga, 25
  - pierwsza, 24
- dobra określoność, 155, 156
- dopasowanie modelu, 203
- dopełnienie Schura, 132
- dualna  $J$ -bezstratna faktoryzacja, 161
- dualna  $J$ -bezstratna funkcja, 157, 159, 160
- dualna  $J$ -unitarna funkcja, 157, 159
- dualna bezstratna funkcja, 156
- dualna homograficzna transformacja, 153
  - rozszerzona, 171
- dualna unitarna funkcja, 156
- dyskretne równania Lapunowa, 121
- dyskretne równanie Riccatiego
  - $\delta ARE$ , 109, 115
  - $DARE$ , 108, 114
- estymacja stanu, 222, 237
- filtr Kalmana–Bucy, 143
- funkcja wrażliwości
  - szumowa, 54, 57
  - wejściowa, 54, 57
  - wyjściowa, 54, 57
- gramian
  - obserwowalności, 126, 156
  - sterowalności, 126, 128, 129
- homograficzna transformacja, 153
  - rozszerzona, 171
- horyzont obserwacji
  - bliższy, 78
  - dalszy, 78
- inwariantne zero, 16

- izometria, 158  
 koniugacja, 12, 14  
 koniugator  
   lewostronny, 164  
   prawostronny, 163, 164  
   stabilizujący  
      $J$ -bezstratny prawostronny,  
       165  
     dualny  $J$ -bezstratny lewo-  
       stronny, 167  
 korekcja Youli-Kučery, 56, 74  
 liniowa frakcyjna (ułamkowa) trans-  
   formacja, 149  
 macierz  
    $J_n$ -ortogonalna, 116  
   Hurwitza, 129  
   nieregularna, 15  
   regularna, 14  
   Schura, 124  
   sygnaturowa, 16  
   sygnaturowa ważona, 16  
   Sylwestera, 29  
   symplektyczna, 116, 117, 120  
   systemowa, 16  
   Toeplitza, 28, 129  
   uogólniona Hamiltona, 116, 119,  
     120  
   Xiao, 128  
 macierz rozproszenia, 148  
   łańcuchowa, 150  
   dualna łańcuchowa, 152  
   rozszerzona łańcuchowa, 170  
   rozszerzona dualna łańcuchowa,  
     171  
 macierzowy pęk, 15  
   nieosobliwy, 15  
   regularny, 109  
   rozszerzony, 109  
 metoda  
    $\mathcal{XY}$ , 188  
    $\mathcal{XZ}$ , 192  
    $\mathcal{YX}$ , 189  
    $\mathcal{YZ}$ , 192  
 model Itô, 142  
 niezmiennicze zero, 16  
 nominalna jakość, 62  
 nominalna stabilność, 54  
 norma  $\mathcal{H}_\infty$ , 16  
 odporna jakość, 53, 62  
 odporna stabilność, 53, 54, 130  
 operator  
    $\delta$ , 11, 12  
    $q$ , 12  
   DHM, 153  
   EDHM, 171  
   EHM, 171  
   HM, 153  
   LFT, 149  
 para względnie pierwsza nad  $\mathcal{RH}_\infty$ ,  
   17  
 parahermitowskie sprzężenie, 12  
 parametr Markowa, 24, 27  
 Pareto optymalność, 55, 181  
 problem LQG, 142  
 prototypowe wielomiany, 83  
 przestrzeń  
    $\mathcal{BH}_\infty$ , 16  
    $\mathcal{GH}_\infty$ , 16  
    $\mathcal{RH}_\infty$ , 16  
    $\mathcal{RL}_\infty$ , 16  
    $\mathcal{R}_P$ , 16  
 przestrzeń Kreina, 159  
 różniczkowe równanie Riccatiego,  
   143



- rekonstrukcja minimalnego modelu, 31
- rozszerzony model, 169
  - z rozszerzonym wejściem, 170
  - z rozszerzonym wyjściem, 169
- rząd aproksymacji pochodnych  $N_\delta$ , 75
- rząd predykcji sterowania  $N_u$ , 77
- rząd predykcji wyjścia  $N_y$ , 75
- rząd uproszczenia nieminimalnego modelu, 27, 31
  
- singularne zero, 64
- standardowy obiekt, 148
- standardowy problem syntezy  $\mathcal{H}_\infty$ , 149, 154, 178, 182
- sterowanie predycyjne w czasie ciągłym, 85, 99
- sterowanie z predyktorem Smitha  $SP$ , 101, 102
- sterowanie z wewnętrznym modelem  $IMC$ , 101, 102
- struktura optymalnego regulatora, 196
  
- unimodularna funkcja, 16
- unitarna funkcja, 156
- uogólniona  $J$ -bezstratna faktoryzacja, 162, 212
- uogólniona dualna  $J$ -bezstratna faktoryzacja, 162
- uogólniony obiekt, 147, 151
- uwarunkowanie dyskretnego równania
  - Lapunowa, 122, 123
  - Riccatiego, 112, 118
  
- wewnętrzna stabilność, 18
- wskaźnik separacji (odstępu), 121
- wskaźniki Bauera-Skeela, 251
- względnie pierwsza faktoryzacja, 17, 151, 153
  - lewostronna, 150
  - prawostronna, 150
- względny horyzont obserwacji
  - bliższy  $\eta_1$ , 82
  - dalszy  $\eta_2$ , 82
- zapas modułu, 61





Sterowanie odporne polega na zapewnieniu układowi sterowania wymaganej stabilności oraz jakości w warunkach występowania niepewności w modelu sterowanego obiektu dynamicznego. Przedmiotem pracy są zagadnienia związane z syntezą liniowych algorytmów odpornego sterowania w czasie dyskretnym obiektami czasu ciągłego. Skupiono się na algorytmach wynikających z metod przestrzeni  $H_\infty$ . Wskazano na znaczenie analizy uwarunkowania zadania syntezy (optymalizacji) sterowania oraz na rolę oceny numerycznych błędów proponowanych algorytmów. Omówiono sposoby polepszania uwarunkowania poprzez zastosowanie modelowania opartego na operatorze *delta*.

W pracy wykazano przydatność łańcuchowych macierzy rozproszenia modelowanego obiektu, udowodniono szereg twierdzeń odnoszących się do  $J$ -bezstratnych faktoryzacji takich macierzy, a także omówiono strukturę algorytmów sterowania optymalnych ze względu na normę  $H_\infty$ .

Teoretyczne rozważania zilustrowano numerycznymi przykładami dotyczącymi zadań odpornego sterowania oraz estymacji stanu. Przykłady te obejmują między innymi: metodę rozmieszczania biegunów, sterowanie predykcyjne, a także sterowanie optymalne ze względu na kwadratowy wskaźnik jakości oraz ze względu na normę  $H_\infty$ .

**ISSN 0208-8029**

**ISBN 83-85847-94-4**

---

---

**W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy  
prosimy o kontakt z Instytutem Badań Systemowych PAN  
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa  
tel. 837-35-78 w. 241 e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl**