

Vrednotenje učinkovitosti različnih metod načrtovanja vodenja orientacije satelita

Jani Čebokli, Andrej Debenjak
Mentor: izr. prof. dr. Maja Atanasijević-Kunc
Fakulteta za elektrotehniko, UL
Tržaška 25, 1000 Ljubljana
jani.cebokli@gmail.com, andrej.debenjak@gmail.com

Efficiency evaluation of different control design methods for satellite orientation

This paper presents multivariable system of satellite with reaction wheels, which is defined in a state space form. For the system four different control structures were designed to enable corresponding satellite orientation. The following methods were used: sequential loop-closing, Penttinen-Koivo method for multivariable PI controller tuning, state feedback decoupling and fuzzy logic. All used methods are briefly presented and illustrated through simulated responses of the closed-loop systems. Quantitative evaluations were realized using different types of criteria: complexity, two integral cost functions and generalized quality control criteria in time domain. Results and comments are presented at the end.

Kratek pregled prispevka

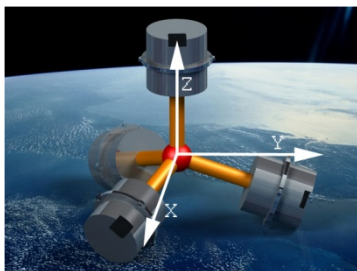
V članku smo predstavili multivariabilen sistem satelita z reakcijskimi kolesi. Sistem je opisan z matrikami v prostoru stanj. Za obravnavan proces smo načrtali ter ovrednotili štiri različne regulacijske strukture, ki zagotavljajo ustrezno orientacijo satelita. Preizkusili smo naslednje metode: zaporedno zapiranje zank, metoda Penttinen-Koivo za uglaševanje multivariabilnih PI regulatorjev, razstavljanje s proporcionalnim regulatorjem na povratnih zvezah iz spremenljivk stanja in regulator z mehko logiko. Članek podaja kratek opis vsake izmed uporabljenih metod ter odzive dobljenih regulacijskih struktur. Metode smo na osnovi več kriterijev tudi kvantitativno ovrednotili in podali rezultate ter komentarje. Pri ocenjevanju smo upoštevali kriterij kompleksnosti, dve integralski cenilki ter posplošene kriterije kvalitete vodenja v časovnem prostoru.

1 Uvod

V članku je predstavljen multivariabilni sistem satelita z reakcijskimi kolesi, na katerem smo preizkusili različne metode načrtovanja vodenja multivariabilnih sistemov (zaporedno zapiranje zank, metoda Penttinen-Koivo za uglaševanje multivariabilnih PI regulatorjev, razstavljanje s proporcionalnim regulatorjem na povratnih zvezah iz spremenljivk stanja, regulator z mehko logiko). Preizkušene metode smo s pomočjo več kriterijev medsebojno ovrednotili.

2 Predstavitev sistema

Sistem sestoji iz togega telesa, ki predstavlja celoten satelit ter štirih reakcijskih koles, ki so znotraj satelita postavljena v tetraeder in omogočajo rotacijo satelita [1]. Poenostavljeno shemo prikazuje Slika 1. Posamezno reakcijsko kolo je sestavljeno iz enosmernega elektromotorja in vztrajnika. Za rotacijo satelita okrog vseh treh osi bi zadostovala tri reakcijska kolesa, vendar je v praksi največkrat uporabljena tetraedična razporeditev štirih. To omogoča rotacijo satelita okrog vseh osi tudi v primeru okvare enega izmed reakcijskih koles.



Slika 1: Shema postavitve reakcijskih koles

Obravnavani sistem ima 4 vhode (napetosti motorjev) ter 3 izhode (kotni zasuki satelita). Ker nekatere metode načrtovanja regulacijskih struktur, ki smo jih želeli vrednotiti, zahtevajo enako število vhodov ter izhodov (kvadraten sistem), smo s pomočjo predkompensatorja zadostili tej zahtevi. Načrtani predkompensator poskrbi za ustrezno porazdelitev regulacijske moči med posamezne motorje (aktuatorje). Skušali smo zadostiti pogoju, da določen vhod najbolj vpliva na istoležni izhod. Za nadaljnje načrtovanje vodenja smo uporabljali sistem v

prostoru stanj, ki je vključeval sistem s predkompensatorjem. A, B, C in D matrice ustrezno preoblikovanega sistema [2] so naslednje:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 \\ 0 & 0 & 0 & -0,6255 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,6255 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,6255 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,6255 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,6255 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0001 & 0,0001 & 0,0001 & 0,0001 & 0 & -0,1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0001 & 0,0001 & 0,0001 & 0,0001 & 0 & 0 & 0 & -0,05 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 112,5000 & 0 \\ 0 & 50,0000 & -12,5000 & 0 \\ 87,5000 & -50,0000 & 0 & 0 \\ -37,5000 & -25,0000 & 0 & 0 \\ 0,0217 & -0,0043 & 0 & 0 \\ -0,0050 & 0,0162 & -0,0022 & 0 \\ -0,0050 & 0,0025 & 0,0238 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(1)

2.1 Analiza

Analiza sistema, ki smo jo izvedli s pomočjo orodja LABI v programskem okolju Matlab [3,4,5], je pokazala naslednje lastnosti, ki so pomembne za načrtovanje obravnavanega sistema: sistem je stabilen, vodljiv, ni spoznaven, je funkcionalno vodljiv, izhodno funkcionalno vodljiv, detektabilen in stabilizabilen. Poli sistema so naslednji: $s_{1,2,3,4} = -0,626$, $s_{5,6} = -0,1$, $s_7 = -0,05$, $s_{8,9,10} = 0$.

3 Načrtovanje vodenja

Vodenje sistema smo načrtali s pomočjo štirih različnih metod [6,7,8,9]: zaporedno zapiranje zank, uglaševanje multivariabilnega PI regulatorja s pomočjo metode Penttinen-Koivo, razstavljanje s proporcionalnim regulatorjem na povratnih zvezah iz spremenljivk stanja in s pomočjo mehke logike.

3.1 Metoda zaporednega zapiranja zank

Ta metoda skuša posnemati univariabilni pristop načrtovanja, pri čemer je potrebno pozornost posvetiti spremenjenim lastnostim procesa po vsakem koraku načrtovanja. Najprej smo načrtali PI regulatorje za posamezne direktne vhodno-izhodne pare. Nadalje pa smo s pomočjo križnih regulatorjev še dodatno zmanjšali vpliv križnih povezav. Rezultat

načrtovanja opisuje naslednja regulatorna matrika:

$$K_{reg}(s) = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} 7(s + 0,093) & 0,8(s + 0,188) & 0,1(s + 0,5) \\ 3(s + 0,067) & 8(s + 0,1) & 0,5(s + 0,1) \\ 1,5(s + 0,1) & -0,5(s + 0,1) & 6(s + 0,05) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Metoda je s stališča izhodiščnega pristopa načrtovanja preprosta in intuitivna, omogoča pa tudi direkten vpliv načrtovalca na regulacijsko strukturo. Povezati jo je mogoče tudi z analizo ob uporabi inverznega Nyquistovega diagrama. V našem primeru zaradi relativne enostavnosti procesa tovrsten pristop ni povzročal večjih težav.

3.2 Uglasovanje multivariabilnega regulatorja po metodi Penttinen-Koivo

Ta metoda sestoji iz dveh korakov načrtovanja. Prvi je grobo uglasovanje, ki mu sledi fino uglasovanje. Pri finem uglasovanju moramo eksperimentalno nastaviti le dva parametra γ in δ , kar predstavlja direkten paralelizem univariabilnim pristopom. Regulatorski matriki določimo s pomočjo naslednjih enačb:

$$K_p = \gamma(CB + CAB)^{-1} = 0,1 \begin{bmatrix} 49,483 & 13,075 & 1,192 \\ 16,473 & 65,372 & 5,959 \\ 8,683 & -4,129 & 41,729 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K_i = \delta K_s^{-1} = \delta G^{-1}(s)|_{s=0} = 0,15 \begin{bmatrix} 3,095 & 0,818 & 0,037 \\ 1,031 & 4,089 & 0,186 \\ 0,543 & -0,258 & 1,305 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kjer je $G(s)$ matrika prenosnih funkcij sistema.

Uporaba predstavljene metode je v primeru nesingularnosti grobih matrik uglasovanja zelo enostavna, predlagana struktura pa pogosto zadošča za zadostitev ciljem načrtovanja.

3.3 Razstavljanje s proporcionalnim regulatorjem na povratnih zvezah iz spremenljivk stanja

Razstavljanje multivariabilnih sistemov teži k izničenju križnih povezav, kar prevede problem na množico univariabilnih, med seboj neodvisnih podsistemov. To praviloma zelo izboljša kvaliteto vodenja in omogoča v nadaljevanju zgolj uporabo univariabilnih regulatorjev.

Načrtali smo razstavljanje v časovnem prostoru s proporcionalnim regulatorjem v direktni veji in s proporcionalnim regulatorjem na povratnih zvezah iz spremenljivk stanj (ki so direktno merljiva). Sistem je razstavljen, če je njegova matrika prenosnih funkcij diagonalna, oziroma so vsi izvendiagonalni členi enaki nič. Sistem v prostoru stanj je mogoče razstaviti s pomočjo regulacijskega zakona (5), pri čemer sta matriki F in G konstantni.

$$u = Fx + Gr \quad (5)$$

Izbrani regulacijski matriki sta v obravnavanem primeru določeni kot:

$$F = \begin{bmatrix} -5,4981 & -1,8304 & -0,9648 \\ -1,4527 & -7,2636 & 0,4588 \\ -0,1324 & -0,6622 & -4,6365 \\ 0,0001 & 0,0007 & 0,0052 \\ 0,0013 & 0,0067 & -0,0031 \\ 0,0045 & -0,0027 & -0,0014 \\ -0,0063 & -0,0062 & -0,0033 \\ -28,040 & -9,3349 & -4,9206 \\ -7,4089 & -37,044 & 2,3396 \\ -0,7350 & -3,6749 & -25,733 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$G = \begin{bmatrix} 4,9483 & 1,3074 & 0,1192 \\ 1,6473 & 6,5372 & 0,5959 \\ 0,8683 & -0,4129 & 4,1729 \end{bmatrix} \quad (7)$$

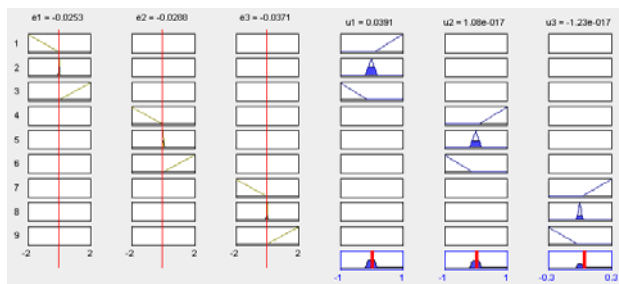
Metoda načrtovanja je dobro algoritimizirana in poleg razstavljana omogoča tudi premikanje polov.

3.4 Načrtovanje vodenja z mehko logiko

Prednost tovrstnega načrtovanja vodenja je v tem, da ni potrebno posebej paziti na multivariabilnost sistema in je zato s tega

stališča za načrtovalca nekoliko preprostejša. Pri načrtovanju smo se osredotočili na določitev ustreznih pripadnostnih funkcij ter pravil. Za gradnjo regulatorja smo uporabili Matlab-ov vmesnik za gradnjo mehkih regulatorjev (Fuzzy Logic Builder). Ker naš sistem zahteva za izničenje pogreškov v ustaljenem stanju integrirni tip regulatorja, smo to zahtevo izpolnili tako, da smo izhod regulatorja z mehko logiko še integrirali.

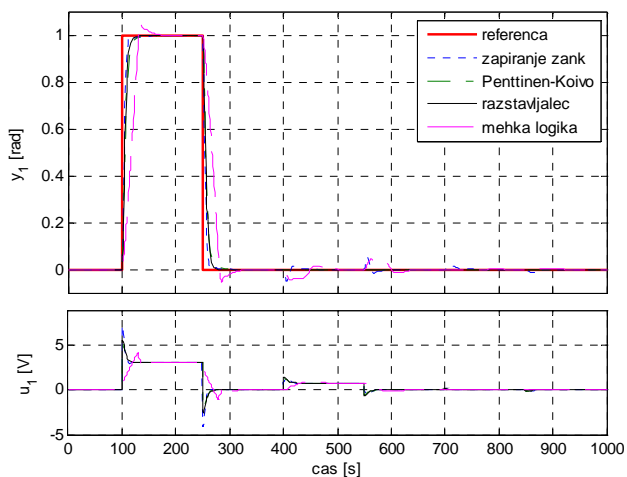
Rezultat načrtovana je ilustriran na sliki 2.



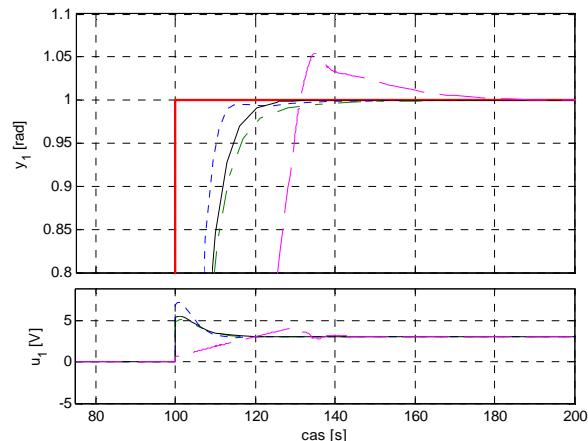
Slika 2: Pripadnostne funkcije

3.5 Simulacijski rezultati

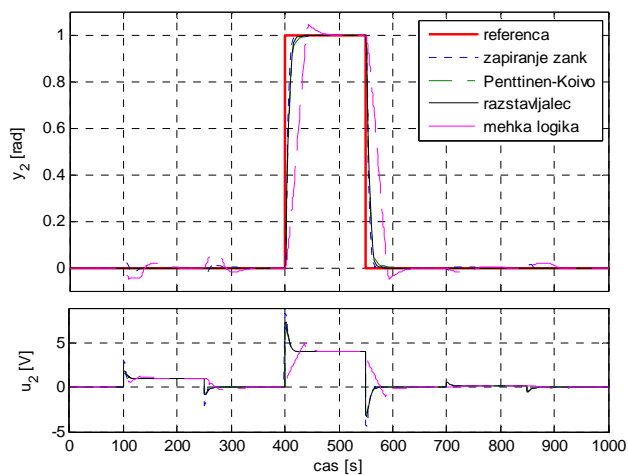
Vse načrtane regulatorje smo simulacijsko testirali v programskem okolju Matlab/Simulink. Uporabljeni signali vzbujanja in pripadajoči odzivi so ilustrirani na slikah 3 do 8.



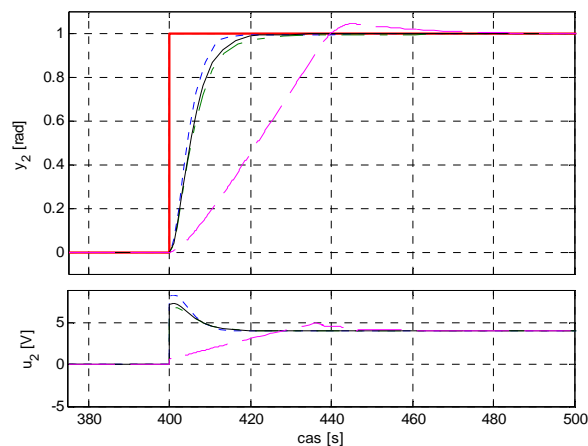
Slika 3: Odziv sistema - prvi izhod



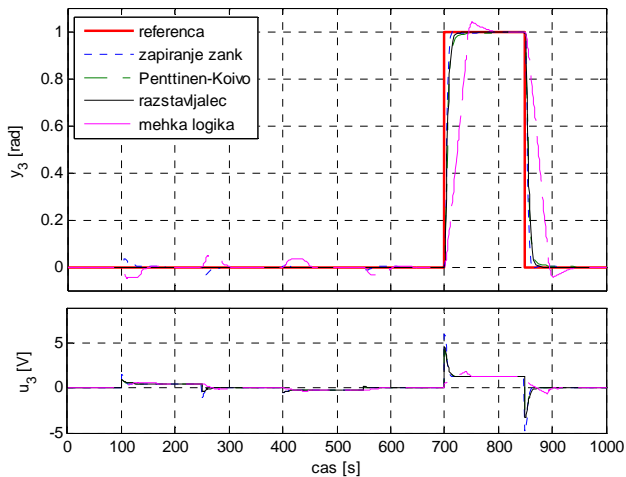
Slika 4: Odziv sistema - prvi izhod



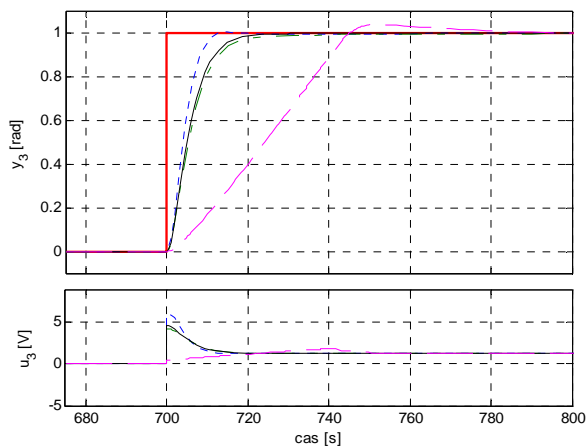
Slika 5: Odziv sistema - drugi izhod



Slika 6: Odziv sistema - drugi izhod



Slika 7: Odziv sistema - tretji izhod



Slika 8: Odziv sistema - tretji izhod

4 Vrednotenje

Vse načrtane regulatorje smo ovrednotili s pomočjo različnih kriterijev [4,10]. Pri tem smo upoštevali: kompleksnost, čase zakasnitev, čase umiritve, maksimalne prevzpone ter cenilko pogreškov in cenilko regulirnih veličin.

Kompleksnost smo ocenjevali na podlagi reda in prostostne stopnje regulatorja, to je minimalnega števila blokov, ki jih realizacija regulatorja zahteva. V splošnem so seveda bolj zaželene preprostejšje regulacijske strukture.

Čas zakasnitve je čas, ki ga zaprtozančni sistem potrebuje, da doseže 50 % vrednosti v ustaljenem stanju.

Čas umiritve je čas, ko odziv zaprtozančnega sistema doseže izbrano tolerančno območje in

ga več ne zapusti. V našem primeru smo uporabili 2 % tolerančni pas.

Maksimalni prevzpon je razlika med maksimalno vrednostjo, ki jo doseže odziv sistema ter referenco.

Za potrebe ocenjevanja kvalitete zaprtozančnega delovanja multivariabilnih sistemov je potrebno kriterije ustrezno razširiti. Obravnavani kriteriji iz skalarnih vrednosti pri univariabilnih sistemih preidejo v matrike pri multivariabilnih.

Poleg omenjenih kriterijev smo kvaliteto vodenja ocenjevali tudi z dvema integralskima cenilkama, kot ju opisujeta enačbi (8) in (9).

Cenilka pogreška:

$$J_e = \sum_{i=1}^3 \int_0^t |e_i| dt \quad (8)$$

Cenilka regulirne veličine:

$$J_u = \sum_{i=1}^3 \int_0^t |u_i| dt \quad (9)$$

Tabela 1 podaja vrednotenje v numeričnem smislu. Vrednosti so bile dobljene na naslednji način:

- Za izhodišče je bila izbrana metoda zaporednega zapiranja zank, vse vrednosti ostalih metod so normirane nanjo. Če je vrednost rezultata večja od ena, potem je ocena slabša, če pa je vrednost manjša od ena, je rezultat pri tem kriteriju boljši od izhodiščne rešitve.
- Pri kriterijih časov zakasnitve, umiritve in maksimalnih prevzponov je bil uporabljen seštevek elementov matrik posameznih kriterijev.
- V zaključni fazi smo sešteli vse normirane kriterije ter jih spet normirali na vrednost metode zaporednega zapiranja zank.

Tabela 1: Relativno vrednotenje načrtanega vodenja

	zaporedno zapiranje zank	Penttinen-Koivo	razstavljalec iz stanj	mehka logika
kompleksnost	1	1	2	2
čas zakasnitve	1	1,31	0,13	2,75
čas umiritve	1	0,58	0,41	3,46
maksimalni prevzpon	1	0,85	0,85	1,2
cenilk pogreška	1	1,19	1,07	4,38
cenilka reg. veličine	1	0,98	0,98	0,94
vsota kriterijev	6	5,91	5,44	14,72
ocena (normirana vsota)	1	0,98	0,91	2,45

5 Zaključki

Glede na izbrano metodologijo vrednotenja, je najboljšo oceno dosegla metoda z razstavljanjem. Edina pomanjkljivost te metode proti njeni neposredni tekmeči (Penttinen-Koivo) je njena kompleksnost.

Opaziti je tudi, da je regulator z mehko logiko po vseh kriterijih slabši od ostalih. To je posledica naše neizkušenosti pri načrtovanju regulatorjev z mehko logiko (določanje pripadnostnih funkcij ter določitev pravil) in neuporaba optimizacijskih postopkov pri načrtovanju. Regulator z mehko logiko bi se izkazal za primernejšega v primeru realnega nelinearnega sistema, saj omogoča več prilagoditev.

Iz slik 3 do 8 je razvidno, da regulirna veličina ostaja znotraj želenih vrednosti, kar je zelo zaželena lastnost. Za to smo poskrbeli že med načrtovanjem s pomočjo kriterijskih funkcij pri optimizaciji ter pri nastavku zaprtizančnega polinoma za razstavljalec.

Pri ocenjevanju pogreška s cenilko (8) se je najbolje izkazala metoda zaporednega zapiranja zank. Po drugi strani pa se je pri kriteriju porabe energije, ki smo ga računali s cenilko (9), najbolje odrezal regulator z mehko logiko.

6 Literatura

- [1] M. Bošnjak, S. Blažič, D. Matko, Moon orbiter simulator for the ESA project ESMO, Proceedings of the 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, September 6-10, 2010, Prague, Vol. 2.
- [2] A. Debenjak, J. Čebokli, A. Borse, Seminarska naloga pri predmetu Multivariabilni sistemi, januar 2011.
- [3] Matlab, The Language of Technical Computing, Version 7.9.0, The MathWorks Inc., 2009.
- [4] M. Atanasijević-Kunc, R. Karba, B. Zupančič: LABI - modelling and analysis through examples, Proceedings of the 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, September 2010, Prague, Vol. 2.
- [5] J. M. Maciejowski, Multivariable Frequency Domain Toolbox, User's Guide, Cambridge Control Ltd, and GEC Engineering Research Centre, 1990.
- [6] R. Karba, M. Atanasijević-Kunc, Multivariabilni sistemi, Založba FE in FRI, Ljubljana 2010.
- [7] M. Atanasijević-Kunc, Multivariabilni sistemi, analiza in načrtovanje skozi primere, Založba FE in FRI, Ljubljana 2003.
- [8] M. Atanasijević-Kunc: Multivariabilni sistemi – Zbirka kompleksnejših problemov, Založba FE in FRI, Ljubljana 2004-05.
- [9] D. Matko: Računalniško vodenje procesov, Založba Fakultete za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana 1995.
- [10] B. Zupančič, Zvezni regulacijski sistemi - I.del, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1996.