

Aplikativna izvedba poenostavljenega eksplicitnega prediktivnega regulatorja na pilotni napravi

**Samo Gerkšič¹, Boštjan Pregelj¹, Stanko Strmčnik¹,
Aleš Šink², Tadej Jerovšek², Aleksander Preglej², Igor Steiner²**

¹ Odsek za sistem in vodenje, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, Ljubljana

² INEA, d.o.o., Stegne 11, Ljubljana

Samo.Gerksic@ijs.si

Pilot plant implementation of simplified explicit model predictive control

We present two pilot-plant case-studies of design methods for simplified explicit model predictive control which have been developed recently. The tests have been conducted on a liquid-level control laboratory pilot plant in two configurations: single-input single-output, and two-input single-output. The simplified explicit implementation of a predictive controller enables a relatively non-demanding execution of the remaining on-line computation, based on a binary search tree, without using on-line optimisation, facilitating short sampling times. The controller was implemented in the form of function blocks for the IDR Blok development environment, using a Mitsubishi MELSEC Q06 industrial programmable logic controller. We show practical advantages due to the constraints-handling ability of the predictive controller.

Kratek pregled prispevka

V preteklih letih razvite metode za načrtovanje poenostavljenega eksplicitnega prediktivnega regulatorja smo preizkusili v dveh pilotnih aplikacijah regulacije nivoja tekočine na laboratorijski eksperimentalni napravi, v konfiguracijah z enim vhodom in enim izhodom ter dvema vdoma in enim izhodom. Poenostavljena eksplicitna izvedba prediktivnega regulatorja omogoči relativno nezahtevno izvedbo sprotnega dela algoritma na podlagi binarnega iskalnega drevesa brez uporabe sprotne optimizacije, kar omogoča uporabo kratkih časov vzorčenja. Regulator smo izvedli v obliki funkcijskih blokov za okolje IDR Blok na programabilnem logičnem krmilniku Mitsubishi MELSEC Q06. Prikazali smo praktične prednosti, ki jih omogoča prediktivni regulator s sistematično obravnavo omejitev na procesnih signalih.

1 Uvod

Prediktivni regulatorji (PR, angl. model-based predictive control oz. MPC) temeljijo na napovedovanju prihodnjega poteka regulacijskih signalov s pomočjo modela procesa [1]. Pri tem običajno uporabljajo sprotno optimizacijo izbrane cenilke prihodnjega odziva v obliki matematične norme. Ena glavnih praktičnih prednosti PR v primerjavi s sorodnimi linearnimi kvadratnimi optimalnimi regulatorji (LQR) je možnost upoštevanja omejitev na optimizacijskih signalih. PR so se v praksi uveljavili zlasti za vodenje procesov z veliko vhodi in izhodi v prisotnosti omejitev [2], medtem ko prednosti pri univariabilnih procesih večinoma niso tako očitne, da bi odtehtale zahtevnost izvedbe sprotne optimizacije.

Ena od možnosti za manj zahtevno izvedbo PR je uporaba eksplicitne oz. (multi-)parametrične izvedbe PR (krajše EPR) [3][4][5][6]. Pri tem regulacijski zakon izračunamo v fazi načrtovanja regulatorja vnaprej za celotno področje parametrov optimizacijskega problema. Računsko breme tako preselimo iz sprotne regulacijske zanke v fazo načrtovanja regulatorja. Pri tem z algoritmom tipično razdelimo celotno področje parametrov optimizacijskega problema, ki se ujemajo s stanji razširjenega dinamičnega modela procesa, na particijo, ki je sestavljena iz poliedričnih regij. Vsaka regija je določena z istim naborom aktivnih omejitev, v njej pa velja lokalni regulacijski zakon, po strukturi podoben LQR z dodatnim konstantnim odmikom.

Eksplicitna izvedba je zaradi parametrične eksplozije in možnih težav z računsko pogojenostjo primerna le za relativno majhne optimizacijske probleme. Poleg tega postane pri velikem številu regij v particiji tudi preostali sprotni čas iskanja aktivne regije relativno dolg [7,8]. Metodo smo poskusno aplikativno izvedli v študiji [9], vendar je bila praktična prednost zaradi upoštevanja omejitev relativno majhna, numerične težave pa so onemogočile izvedbo mehkih izhodnih omejitev.

Reševanja opaženih težav smo se najprej lotili s poglobljenim študijem numerične problematike metod za določanje particij EPR na podlagi parametričnega programiranja [10] in parametričnega problema linearne komplementarnosti [11], kjer smo sistematično pregledali numerično vprašljive točke v algoritmih in predlagali vrsto izboljšav za numerično robustnejšo izvedbo in za zaznavanje slabe pogojenosti.

Sledile so raziskave možnosti poenostavitve particije, pri čemer se je kot najbolj obetavna izkazala metoda redčenja izhodnih omejitev [11]. Običajno so omejitve postavljene na vsakem časovnem koraku napovedanega poteka signalov, medtem ko jih pri metodi redčenja postavimo le na nekaterih ustrezno razporejenih korakih napovedi. Za razliko od večine znanih metod manjšanja računske zahtevnosti pri tem ni potrebno najprej izračunati nepoenostavljene rešitve. Metoda tudi zmanjša numerične težave, do katerih prihaja zaradi majhnosti nekaterih regij, saj je zaradi manjšega števila omejitev tudi razdrobljenost particije manjša.

Z izboljšavami algoritmov za izračun EPR se ukvarjajo tudi druge raziskovalne skupine [12, 13], ki so prav tako naletele na numerično problematiko in nakazale možnost uporabe za multivariabilne procese, vendar so njihovi testni primeri bolj teoretičnega značaja, medtem ko smo z našim pristopom uspeli pokazati uporabnost na praktičnih regulacijskih problemih z mehкими izhodnimi omejitvami [14].

V tem prispevku opisujemo pilotno aplikacijo poenostavljene EPR (PEPR) na podlagi numerično izboljšanih algoritmov na pilotni napravi treh posod v procesnem laboratoriju Odseka za sisteme in vodenje IJS, pri čemer je regulator izveden v industrijskem programabilnem logičnem krmilniku (PLK). Začenjamo s predstavitvijo pilotne naprave in izvedbene platforme. Sledi prikaz aplikacije PEPR za dve konfiguraciji: z enim vhodom (1x1) in izhodom ter z dvema vhomoma in enim izhodom (2x1).

2 Pilotna naprava

2.1 Naprava treh posod

Preizkušanje algoritmov je potekalo na napravi treh posod v Procesnem laboratoriju Odseka za sisteme in vodenje IJS na sliki 1. Napravo sestavljajo tri posode, v katerih lahko merimo nivo tekočine, medsebojno pa so povezane z omrežjem vodov z ventili in črpalkami. Naprava je prikladna za testiranje tovrstnih regulacijskih algoritmov in omogoča preizkušanje v različnih konfiguracijah vhodov in izhodov.

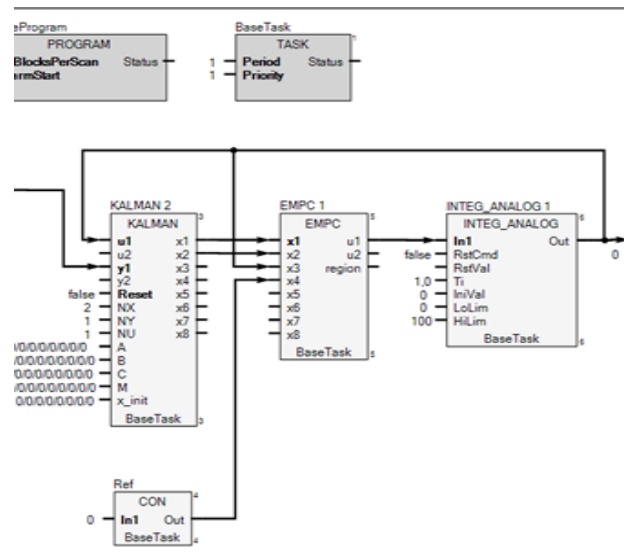


Slika 1: Naprava treh posod

2.2 Izvedbena platforma

Izračun regulatorjev temelji na ogrodju odprtokodne knjižnice Multi-Parametric Toolbox (MPT) [5] in njene metode YalmipCFTOC [15], ki smo jo nadgradili z izboljšanimi numeričnimi izračuni in poenostavljanjem regulatorja [10,11]. Regulatorje smo uglasili najprej z uporabo svoje knjižnice LLAPC [16] za lokalno linearno analizo zaprtizančnega sistema s prediktivnim regulatorjem, nato simulacijsko v okolju Matlab-Simulink. Končna izvedba je bila na industrijskem PLK Mitsubishi MELSEC Q06UDH. Izvedena je bila v razvojnem okolju IDR Blok. Slika 2 predstavlja izsek regulacijske sheme, na katerem je izveden regulator, zgrajen

iz treh funkcijskih blokov. Prvi blok KALMAN vsebuje ocenjevalnik stanj procesa x iz meritev y in preteklih vrednosti izhoda regulatorja u v obliki časovno-diskretnega Kalmanovega filtra. Drugi blok EMPC izvaja iskanje aktivne regije po drevesni strukturi in potem izračuna aktivni lokalni regulacijski zakon. Tretji blok INTEG_ANALOG je uporabljen kot časovno diskretni integrator, ki integrira inkrementalni izhod bloka EMPC.

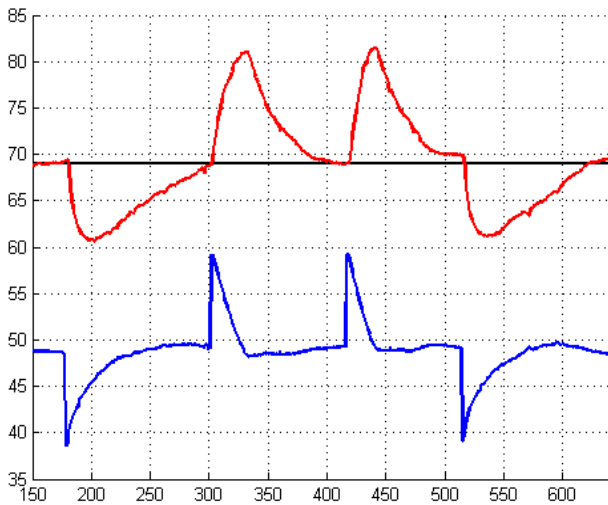


Slika 2: Izvedba regulatorja v okolju IDR Blok
v okolju IDR Blok

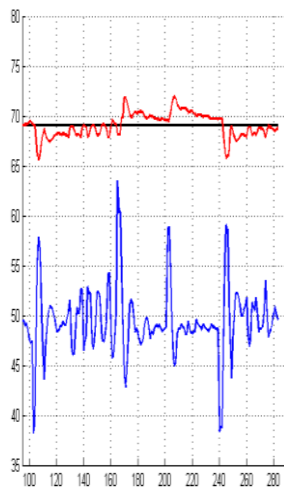
3 Konfiguracija 1x1

Pri prvi konfiguraciji gre za univariabilni sistem regulacije nivoja tekočine v prvi posodi z enega vhoda, t.j. napetosti na črpalki. Za ilustracijo si najprej oglejmo regulacijski odziv dveh uglasitev PI regulatorja na zaporedje ročno proženih stopničastih bremenskih motenj amplitud -10, 10, 10, -10 na vhodu procesa. Parametre smo najprej določili z uporabo nastavitvenih pravil, nato pa še z dodatno eksperimentalno ročno uglasitvijo; D člen zaradi znatnega šuma ni izboljšal odziva. Prva uglasitev PI1 s parametri $K_P = 0.5$, $T_I = 26$ na sliki 3 ima relativno počasen regulacijski odziv z uglajenim regulirnim signalom u in velikimi odkloni izhodnega signala y . Druga uglasitev PI2 s $K_P = 5$, $T_I = 26$ na sliki 4 ima hiter regulacijski odziv z mnogo manjšimi odkloni y ,

vendar ima u visoko varianco in je sistem blizu oscilatornosti.



Slika 3: Eksperimentalni odziv P11, $K_P = 0.5$, $T_I = 26$ (rdeča: y , črna: y_{ref} , modra: u)

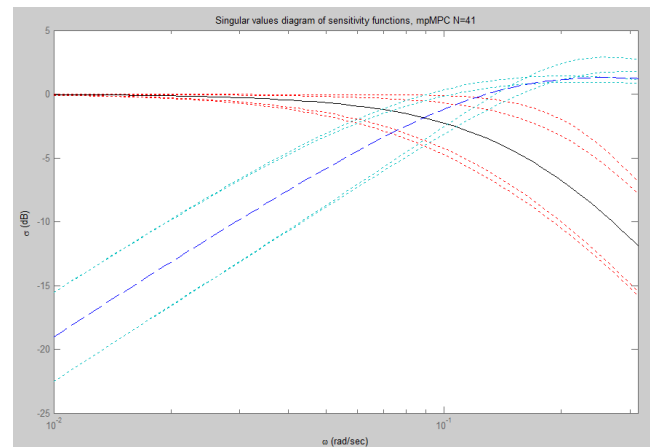


Slika 4: Eksperimentalni odziv PI2, $K_P = 5$, $T_I = 26$

Načrtovanje PEPR smo začeli z eksperimentalnim modeliranjem. Za nominalni model smo izbrali časovno diskretni linearni model prvega reda v prostoru stanj: $A = -0.0304$, $B = 1$, $C = 0.0918$, $D = 0$ s časom vzorčenja $T_S = 1$ s.

Uporabili smo enotno zgrajeni koncept PR na podlagi ocenjevanja motenj, opisan v [16], kjer je podan tudi opis razširitve modela za ocenjevanje motenj in sledilno delovanje. Ker nas je zanimalo predvsem regulacijsko delovanje regulatorja pri vhodnih bremenskih motnjah, smo za nemerljive motnje uporabili model vhodne motnje.

S pomočjo lokalne linearne analize in simulacij smo določili naslednje uglastivne parametre: (PEPR1) prediktivni horizont $N = 41$, interval vpliva z dvema podintervaloma dolžin [4 37], utež izhoda $Q_y = 1$, utež spremembe vhoda $R_{du} = 0.05$; (Kalmanov filter) kovarianca stanj $Q_K = \text{diag}(10, 100)$, kovarianca izhoda $R_K = 1$. Slika 5 prikazuje enega izmed rezultatov lokalne linearne analize, diagram singularnih vrednosti občutljivostnih funkcij $S(\omega)$ in $T(\omega)$. Na sliki 6 pa je eksperimentalni odziv dobljenega regulatorja, brez izhodnih omejitev. Vidimo lahko, da so odkloni y primerljivi s tistimi pri uglastitvi PI2, pri tem pa je signal u precej manj agresiven in oscilatornosti ni.



Slika 5: PEPR1, diagram singularnih vrednosti občutljivostnih funkcij $S(\omega)$ (nominalni model: modra prekinjena; družina podobnih modelov: svetlo modra črtkana) in $T(\omega)$ (nominalni model: črna; družina modelov: rdeča črtkana)



Slika 6: Eksperimentalni odziv PEPR1, brez izhodnih omejitev, $R_{du} = 0.05$

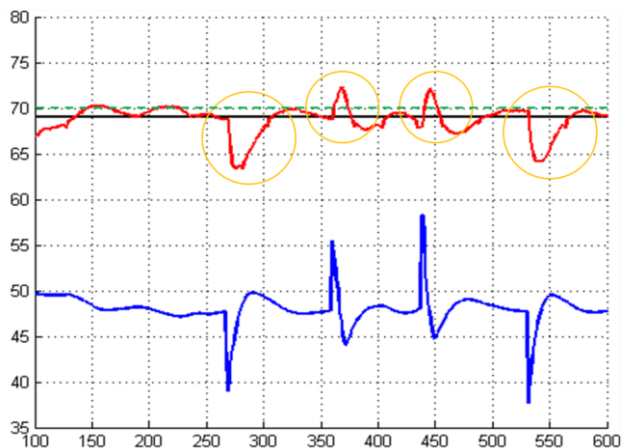
3.1 Obravnava izhodnih omejitev

Pri prediktivnih regulatorjih nas v praksi posebej zanima njihova zmožnost upoštevanja omejitev. Za naš primer želimo, naj vrednost izhoda y čimmanj presega mehko omejitev $y_{\max} = 70$. Kršitev mehke omejitve ima utež $S_y = 1000$, največja dovoljena kršitev pa je $s_{y_{\max}} = 100$.

Simulacijski in eksperimentalni preizkusi gornjega regulatorja PEPR1 pokažejo, da se odzivi z in brez mehke omejitve y praktično ne razlikujejo, kar je v splošnem precej pogosto opažanje pri univariabilnih procesih. Vzrok leži v tem, da v območju kršitve mehke izhodne omejitve optimizacijski problem PR nima stopnje prostosti, ki bi jo lahko uporabil v izogib kršitvi oz. za zmanjšanje kršitve.

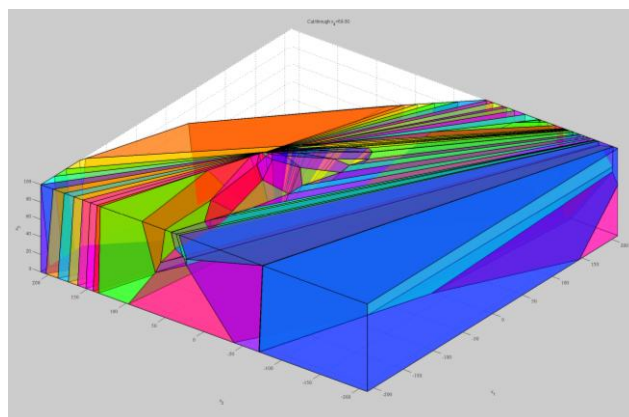
V našem primeru smo poiskali specifične razmere, v katerih univariabilni PR lahko reagira na aktivnost izhodne omejitve na praktično smiseln način. Gre za razmere, ko želimo v režimu običajnega delovanja relativno počasen in uglajen regulacijski odziv, po drugi strani pa agresiven odziv, kadar grozi kršitev omejitve. Pri taki uglastitvi v stroškovni funkciji PR običajno prevladuje strošek spremembe regulirnega signala nad stroškom regulacijskega pogreška; kadar pa y preseže mehko omejitev, se pojavi še višji strošek mehke omejitve.

Spremenjena uglastitev PEPR2 se od PEPR1 razlikuje le v uteži spremembe vhoda procesa $R_{du} = 80$. Za poenostavitev regulacijskega problema smo razredčili postavitev izhodnih omejitev, tako da so izhodne omejitve postavljene na vsakem četrtem vzorcu v prediktivnem intervalu. Na sliki 7 je prikazan eksperimentalni odziv. Regulirni signal u je večinoma uglajen, vseeno pa odkloni y ob bremenskih motnjah s pozitivnimi amplitudami le malenkostno presegajo tiste pri uglastitvi PEPR1. Odzivi na bremenske motnje v različnih smereh so močno asimetrični.



Slika 7: Eksperimentalni odziv PEPR2, $R_{du} = 0.05$; mehka omejitev $y_{\max} = 70$ (zeleni črtkana)

Dobljeni regulator ima 181 regij. Slika 8 prikazuje projekcijo tridimenzionalnega prereza njegove particije, pri čemer je četrti parameter fiksiran na 69. Za hitrejše sprotne določanje aktivne regije poliedrično particijo pretvorimo v odločitveno drevo s 641 vozlišči. Ovrednotenje odločitvenega drevesa globine 8 na izbranem PLK traja 6 ms.

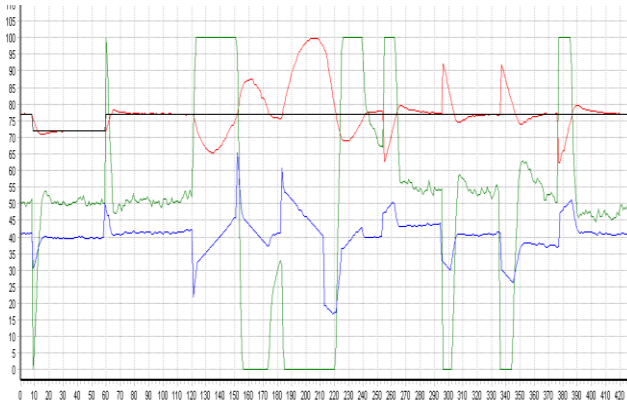


Slika 8: Projekcija tridimenzionalnega prereza particije eMPC regulatorja

4 Konfiguracija 2x1

Pri tej konfiguraciji reguliramo nivo v tretji posodi naprave z dveh vhodov: črpalke u_1 in ventila u_2 . Dinamika z ventila je hitrejša, vendar je ojačenje z ventila relativno nizko in hitro pride v zasičenje. Slika 9 za primerjavo prikazuje odziv procesa v dvozančni 2xPI regulacijski shemi s parametri $K_{P1} = 0.2$, $T_{I1} = 20$, $K_{P2} = 10$, $T_{I2} = 10$. Sekvenca stopničastih perturbacij iz nazivne delovne točke $y_{\text{ref}} = 77$:

- na y_{ref} , amplitud -5, 5;
- na u_1 , amplitud -20, 20, 20, -20;
- na y , amplitud -15, 15, 15, -15.



Slika 9: Eksperimentalni odziv 2xPI:
rdeča - y , črna - y_{ref} , modra - u_1 , zelena - u_2

Postopek načrtovanja PEPR je bil podoben kot v prejšnjem primeru. Kot nazivni model smo uporabili linearni časovno diskretni model v prostoru stanj

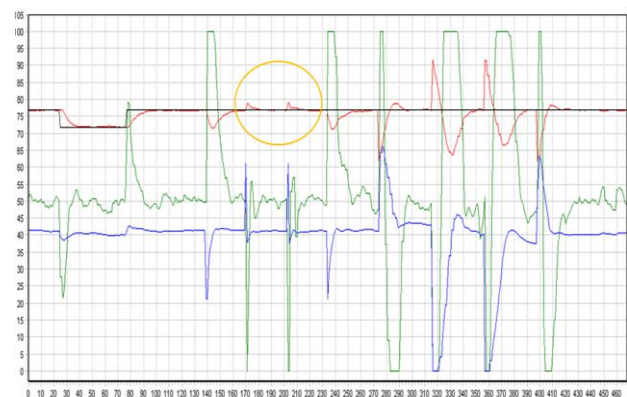
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.9725 & 0 \\ 0 & 0.9384 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.1484 & 0 \\ 0 & 0.0045 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ker je najizrazitejša motnja v procesu lezenje obratov črpalke, smo uporabili model nemerljive motnje z integrirno motnjo na u_1 . Določili smo naslednje uglašitvene parametre: (EPR) $N = 13$, interval vpliva z dvema podintervaloma dolžin [1 12], utež izhoda $Q_y = 1$, utež spremembe vhoda $\mathbf{R}_{du} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{u}_{\text{ref}} = [0; 50]$, utež vhoda $\mathbf{R}_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{bmatrix}$; (KF) kovarianca stanj $\mathbf{Q}_K = \text{diag}(10^{-6}, 10^{-6}, 1)$, kovarianca izhoda $\mathbf{R}_K = 1$.

Mehko omejitvev smo postavili pri $y_{\text{max}} = 77.1$. Spet smo uporabili poenostavljanje regulatorja z redčenjem izhodnih omejitvev, tako da so te postavljene le na vsak četrti vzorec znotraj prediktivnega horizonta. Dobili smo PEPR z le 244 regijami; iskalno drevo za hitro sprotno izračunavanje pa v tem primeru največjo globino 40 in vsebuje 3918 vozlišč.

Slika 10 prikazuje eksperimentalni odziv z dobljenim PEPR. Vidimo lahko zelo učinkovit odziv na stopničaste bremenske motnje (v srednjem delu eksperimenta), še zlasti na rumeno obkrožene bremenske motnje v smeri kršitve mehke omejitve. Spet je očitna asimetričnost odziva na motnje nasprotnih amplitud, ki jo pri PEPR brez izhodne omejitve ni. Odziv na izhodne motnje ni optimalen, ker ta PEPR ni uglašen zanje; vseeno je pri motnjah negativne amplitude odziv primerljiv z 2xPI shemo, medtem ko je podnihaj po motnjah pozitivne amplitude posledica mehke omejitve.



Slika 10: Eksperimentalni odziv PEPR:
rdeča - y , črna - y_{ref} , modra - u_1 , zelena - u_2

5 Sklep

Pri obeh konfiguracijah pilotne naprave smo uspeli z numerično izboljšanimi in poenostavljenimi izvedbami algoritmov EPR dobiti regulatorja, ki sta izvedljiva na industrijskem PLK, kar z izhodiščnimi algoritmi ni bilo mogoče. Primera tudi nazorno pokažeta, za kakšne praktične regulacijske probleme so primerni tovrstni regulatorji.

6 Zahvala

Zahvaljujemo se za sofinanciranje ARRS (L2-2342) in INEA d.o.o..

7 Literatura

- [1] Maciejowski, J. M.: *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, Harlow UK, 2002.
- [2] Qin, S. J., and Badgwell, T. A., A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2003, 11, pp. 733–764.
- [3] Pistikopoulos, E. N., Dua, V., Bozinis, N. A., Bemporad, A., and Morari, M., On-line optimization via off-line parametric optimization tools. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24, pp. 183–188.
- [4] Bemporad, A., Morari, M., Dua, V., and Pistikopoulos, E. N., The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. *Automatica*, 2002, 38, (1), pp. 3–20.
- [5] Kvasnica, M., Grieder, P., and Baotić, M.: Multi-parametric toolbox, 2009. Online: <http://control.ee.ethz.ch/mpt/>
- [6] Bemporad, A.: Hybrid toolbox for real-time applications, user's guide. Technical report, University of Siena, 2006.
- [7] Tøndel P., Johansen T.A., Bemporad A., Evaluation of piecewise affine control via binary search tree. *Automatica* 39(5), 945-950, 2003.
- [8] Zeilinger, M. N., Jones, C. N., and Morari, M., Real-time suboptimal Model Predictive Control using a combination of Explicit MPC and Online Optimization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56, 1524–1534, 2011.
- [9] Gerkšič S., Pregelj B., Steiner I.: O zmanjševanju kršitev izhodnih omejitev s prediktivnim regulatorjem. *Spletna konferenca Avtomatizacija v industriji in gospodarstvu AIG'09*, www.aig.si, 2009.
- [10] Gerkšič S., Improving reliability of partition computation in explicit MPC with MPT toolbox. Proc IFAC World Congress, Milano IT, 2011.
- [11] Gerkšič S., On Computing Partitions of Explicit MPC Controllers via Multi-parametric Linear Complementarity Problem. Delovno poročilo IJS-DP 10954, 2011.
- [12] Gupta, Bhartiya, Nataraj, A novel approach to mpQP, *Automatica* 47, 2112-2117, 2011.
- [13] Patrinos, Sarimveis, A new algorithm for solving convex parametric quadratic programs based on graphical derivatives of solution mappings, *Automatica* 46, 1405-1418, 2010.
- [14] Gerkšič S., de Tommasi, G., Vertical control of ITER plasma using explicit model predictive control. V: 27th Symposium on Fusion Technology SOFT 2012, Liège, 2012.
- [15] Löfberg, J., YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. J. Löfberg. In Proc. CACSD Conference, Taipei TW, 2004. Online: <http://users.isy.liu.se/johanl/yalmip>
- [16] Gerkšič, S., Pregelj, B., Tuning of a tracking multi-parametric predictive controller using local linear analysis, *IET Control Theory & Applications*, 6(5), 669-679, 2012.