

Samo-nastavljanje DMC-ja s pomožnim proporcionalnim regulatorjem

Matija Arh¹, Igor Škrjanc¹

¹Laboratorij za modeliranje, simulacijo in vodenje, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: matija.arh@fe.uni-lj.si

Self-tuning of DMC with an auxiliary proportional regulator

By using self-tuning, process control can be designed in a faster and simpler way unlike is the case with the classical designing methods. Also the operator, using the algorithm can be less experienced and needs less knowledge about the theory of process control.

In this paper we present self-tuning of an advanced predictive control method with internal model for a system with a P-controller. For the P-controller it is well known that it does not provide best control since it can not reach the desired set point if it differs from the one it has been designed for. However, a faster response time can be achieved with it, thus enabling us to design a better controller capable of dealing with the steady-state error for this new system.

By using an auxiliary controller, a faster step response is achieved. It is used for DMC. The approach can be used for stable processes or systems equipped with a P-controller. It is important that approximate parameters of the plant are known since when designing the P-controller and setting the plant to the desired operating point.

1 Uvod

S samo-nastavljanjem dosežemo, da lahko vodenje za proces načrtamo hitreje in predvsem enostavneje, kot s klasičnimi metodami načrtovanja vodenja. Poleg hitrejšega načrtovanja je ena izmed velikih prednosti ta, da je lahko operater, ki uporablja tak pristop, manj izkušen oziroma ne potrebuje veliko znanja o teoriji vodenja.

V tem članku bomo opisali samo-nastavljanje sodobne napovedne metode vodenja s pomočjo modela za proces, katerega smo že načrtali P-regulator. Kot je znano P-regulator ne daje najboljših rezultatov, saj v ustaljenem stanju vedno ostaja regulacijski pogrešek, če proces ni v delovni točki za katero je bil načrtan. Lahko pa s P-regulatorjem pohitrimo odziv procesa, nato pa na tem novem sistemu načrtamo boljši regulator, ki odpravlja tudi pogrešek v ustaljenem stanju.

S pomožnim regulatorjem tako pohitrimo odziv na stopničasto vzbujanje, katerega posnetek potrebuje DMC. Seveda je takšen pristop primeren le za stabilne procese oziroma stabilne sisteme s P-regulatorjem. Prav tako pa moramo poznati približne lastnosti procesa, da lahko izberemo primerno ojačanje P-regulatorja in primerne točke v katerih pomerimo odziv na stopničasto vzbujanje.

2 MPC

Vodenje s pomočjo modela (MPC-model predictive control), včasih imenovano tudi vodenje z drsečim horizontom (RHC-Receding Horizon Control), se razvija že od konca sedemdesetih. Takrat je Richalet v [1] poročal o prvi industrijski aplikaciji modelno napovednega vodenja.

Do danes poznamo vrsto algoritmov, ki spadajo v družino MPC in se lahko uporabijo za vodenje najrazličnejših procesov, vsem pa je skupna eksplicitna uporaba modela procesa za napoved izhoda procesa s pomočjo katerega se izračuna regulirni signal.

Glavna ideja vodenja s pomočjo modela je [2]:

- Uporaba modela procesa za napoved izhoda procesa v prihodnosti.
- Izračun regulirnega signala na način, da se minimizira cenilka (optimizacija).
- Na vhod procesa se vodi samo prva izračunana vrednost regulirnega signala nakar se ob naslednjem trenutku vzorčenja postopek ponovi.

Pri napovednem vodenju s pomočjo modela z algoritmom skušamo optimizirati vrednost regulacijskega signala tako, da minimiziramo kriterijsko funkcijo. Kriterijska funkcija običajno upošteva predvideni regulacijski signal v dolžini horizonta vodenja in napovedani signal izhoda procesa (izhod modela) v dolžini napovednega horizonta. Vrednosti izhoda modela napovemo na podlagi preteklih meritev izhoda procesa in preteklih vrednosti vhodnega signala v proces. V skupino algoritmov vodenja MPC sodi tudi algoritem vodenja z matriko dinamičnega odziva (DMC).

3 DMC

Algoritem vodenja z matriko dinamičnega odziva (DMC-Dynamic Matrix Control) sta Cutler in Ramaker predstavila v [3]. Algoritem uporablja linearen model odziva na stopničasto vzbujanje in optimizira kriterijsko funkcijo, ki upošteva vsoto kvadratov razlike med napovedanim izhodom procesa in referenčno trajektorijo ter vsoto kvadratov sprememb regulirnega signala:

$$J = \sum_{j=1}^{N_P} (\hat{y}(k+j|k) - w(k+j))^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_C} (\Delta u(k+j-1))^2 \quad (1)$$

kjer je \hat{y} napovedana vrednost izhoda procesa, w je vrednost referenčne trajektorije, Δu sprememba napovedanega regulacijskega signala in sta N_P in N_C napovedni horizont in horizont vodenja.

Z uporabo linearnega modela odziva na stopničasto vzbujanje se lahko napovedani izhod procesa zapiše kot matrično množenje matrike dinamičnega odziva in spremembami napovedanega regulirnega signala:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u}_\Delta + \mathbf{f}, \quad (2)$$

kjer je $\hat{\mathbf{y}}$ vektor napovedanih vrednosti izhoda procesa, \mathbf{u}_Δ je vektor napovedanih sprememb vhoda v proces in \mathbf{f} vektor prostega odziva.

Na ta način lahko izračunamo optimalen regulirni signal z linearno kombinacijo preteklih vrednosti, kot rešitev problema najmanjših kvadratov ([2]). Regulacijski zakon zapišemo kot:

$$\mathbf{u}_\Delta = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{w} - \mathbf{f}), \quad (3)$$

kjer je matrika \mathbf{G} matrika dinamičnega odziva sestavljena iz vrednosti modela odziva na stopničasto vzbujanje, \mathbf{w} je vektor referenčnega signala, \mathbf{f} je vektor prostega odziva.

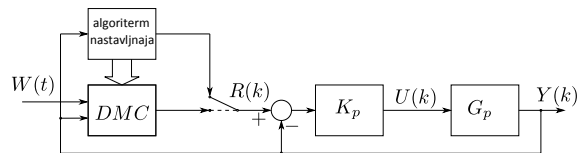
4 DMC s pomožnim P-regulatorjem

Če je proces stabilen in poznamo približne parametre, lahko zanj izberemo P-regulator, s katerim po hitrimo odziv sistema. Nato pa za ta novi sistem izvedemo samo-nastavljanje DMC-ja tako, kot je to prikazano na bločni shemi na sliki 1, da najprej algoritem nastavljanja pripelje sistem v ustaljeno stanje v bližino delovne točke nato pa posname odziv na vzbujanje s stopničastim signalom. Na podlagi izmerjenih vrednosti se nato izračunajo parametri algoritma vodenja DMC.

Če so nam znani približni parametri odprto-zančnega procesa, lahko iz zahteve za delovno točko Y_{00} in skok ΔY iz katerega posnamemo model odziva na stopničasto vzbujanje, lahko izračunamo R_{00} in ΔR :

$$R_{00} = \frac{U_{00}}{K_p} + Y_{00} \quad (4)$$

$$\Delta R = \frac{1 + K_p K_{G_p}}{K_p K_{G_p}} \Delta Y, \quad (5)$$



Slika 1: Bločna shema

kjer je K_{G_p} enosmerno ojačanje procesa. Če parametri niso znani natančno, bomo odziv na stopničasto vzbujanje pomerili v nekoliko drugačni delovni točki, kar pa pri linearnih sistemih nima vpliva na dinamiko regulatorja.

Pred samo-nastavljanjem je potrebno nastaviti še parameter P-regulatorja. Iz znanih približnih parametrov procesa lahko izračunamo P-regulator po nastavitvenih tabelah. Tako smo si izbrali Ziegler-Nichols nastavitveno pravilo [4]

$$K_p = \frac{1}{K_{G_p}} \frac{\tau}{T_p}, \quad (6)$$

kjer je τ čas od začetka preizkusa na stopničasto vzbujanje do presečišča tangente v prevojni točki z abscisno osjo na diagramu odziva, T_p pa je čas od omenjenega presečišča do presečišča tangente in premice vzporedni abscisni osi in na ordinati enaki K_{G_p} . Pri procesih prvega reda je τ enak času zakasnitve, T_p pa časovni konstanti procesa. Ojačanje P-regulatorja smo dejansko nastavili na nekoliko bolj zadržano vrednost za zagotavljanje boljše stabilnosti in robustnosti notranje zanke.

5 Zaščita pred integralskim pobegom

Algoritem DMC v postopku izračuna regulirnega signala izračuna vektor prostega odziva, to je odziv kakršen bi bil, če bi v tistem trenutku izhod regulatorja postavili na vrednost v delovni točki. Ta odziv je odvisen samo od preteklih vrednosti regulirnega signala:

$$f(k+n) = y_m(k) + \sum_{i=1}^N (g_{n+i} - g_i) \Delta r(k-i), \quad (7)$$

kjer je $y_m(k)$ trenutna vrednost izhoda procesa, g_i so vrednosti odziva na stopničasto vzbujanje, N število vzorcev po katerih se odziv na stopničasto vzbujanje umiri, $\Delta r(k-i)$ so pretekle spremembe regulirne veličine, $f(k+n)$ pa je napovedana vrednost prostega odziva za n -ti vzorec v naprej. V primeru da DMC izračuna vrednost, ki krši omejitve je smiselno, da regulator za izračun napovedanega prostega odziva v naslednjem intervalu vzorčenja upošteva vrednost, ki je dejansko bila pripeljana na proces.

Smiselno je, če $R(k) = R_{00} + r(k)$ omejimo že v regulatorju na takšen način, da ne pride do kršitev omejitev aktuatorja. V našem primeru je kršenje omejitev aktuatorja odvisno tudi od pomožnega P-regulatorja, zato je smiselno, da se omejitve v DMC-ju spreminjajo dinamično. Tako kot P-regulator k

regulirnemu signalu, prispeva tudi DMC, zato smo prispevek P-regulatorja ustrezno upoštevali pri omejitvah in tako dobili omejitev za DMC v trenutnem intervalu vzorčenja.

$$R_{max}(k) = \frac{U_{max}}{K_p} + Y(k) \quad (8)$$

$$R_{min}(k) = \frac{U_{min}}{K_p} + Y(k) \quad (9)$$

$$\Delta R_{max}(k) = \frac{\Delta U_{max}}{K_p} + \Delta Y(k) \quad (10)$$

$$\Delta R_{min}(k) = \frac{\Delta U_{min}}{K_p} + \Delta Y(k) \quad (11)$$

6 Rezultati

Opisani način samo-nastavljanja in vodenja smo preizkusili simulacijsko, kakor smo tudi preizkusili zaščito pred integralskim pobegom. Algoritem smo preizkusili tudi na pilotni napravi motor-generator s simulacijo stopničastih motenj.

6.1 Samo-nastavljanje

Na sliki 2 je prikazan potek vhodnega in izhodnega signala simuliranega procesa. Zgoraj je prikazan potek z uporabo dodatnega P-regulatorja, spodaj pa samo DMC. S črno barvo je narisan izhodni signal in s sivo vhodni ter referenca je narisan s pikami. Vidimo lahko da se postopek nastavljanja regulatorja očitno pohitri. Nastavljanje v primeru brez dodatnega P-regulatorja traja približno 100 s, z pa samo 50 s. Uporabljen je bil model s časovno konstanto 10 s in ojačanjem 3 ter perioda vzorčenja dolžine 0,1 s.

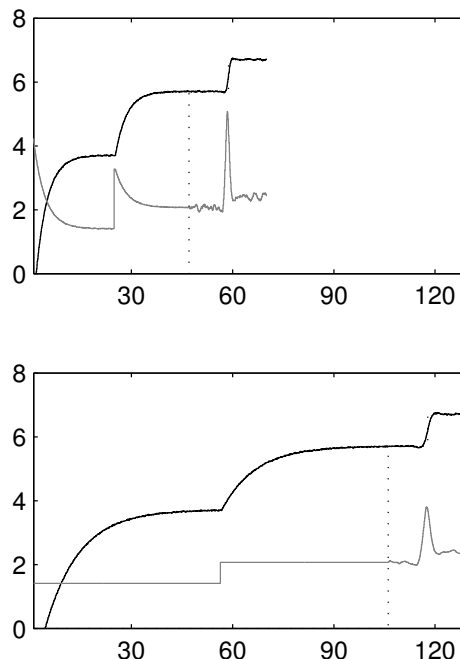
6.2 Integralski pobeg

Na sliki 3 je prikazan potek signalov s katerih se vidi učinek zaščite pred integralskim pobegom. Uporabljena je bila zgornja omejitev na regulirnem signalu vrednosti 3. Najprej se pri približno 60 s spremeni referenca, nato od približno 90 do 100 s pulzna motnja na izhodu simuliranega procesa, nazadnje pa še od približno 120 do 130 s pulzna motnja na vhodu procesa.

Vidimo lahko da z uporabo predlagane zaščite pred integralskim pobegom očitno izboljšamo delovanje regulatorja v delovni točki blizu omejitve.

6.3 Nastavljanje in vodenje na pilotni napravi

Na sliki 4 je prikazan potek signalov samo-nastavljanja regulatorja za laboratorijsko pilotno napravo motor-generator in demonstracija vodenja s simulacijo motenj. Zgornji diagram je premaknjen v desno, tako da je poravnana sprememba reference in simulirane motnje s spodnjim. Na zgornji sliki je prikazan potek signalov z uporabo dodatnega P-regulatorja na spodnji pa brez. Vidimo lahko, da ob primerljivi kakovosti vodenja, čas nastavljanja očitno krajši.



Slika 2: Primerjava samo-nastavljanja z dodatnim P-regulatorjem in brez

6.4 Učinek zaščite pred integralskim pobegom na pilotni napravi

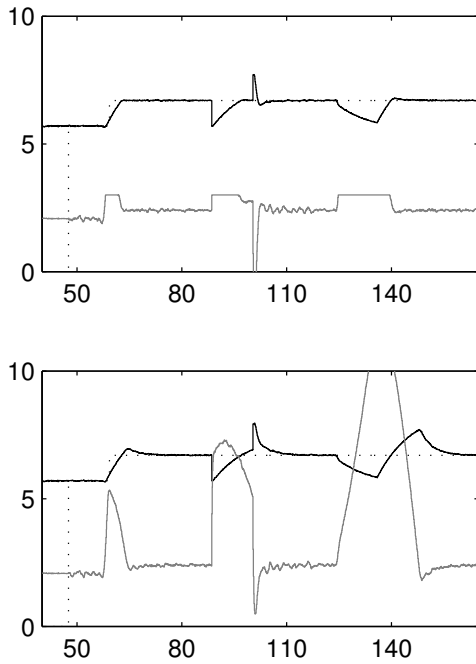
Kot smo preizkusili že simulacijsko, zaščita pred integralskim pobegom ugodno vpliva na kakovost vodenja, kot to lahko vidimo na sliki 5. Za namen demonstracije smo nastavili zgornjo omejitev regulirnega signala tako da je bil vhodni signal na proces $U(k) \leq 2.2$. Na spodnjem grafu na sliki 5 je s sivo pikasto črto narisan vrednost signala na vhodu procesa.

7 Zaključek

Kot je bilo pokazano lahko z uporabo pomožnega regulatorja precej skrajšamo čas samo-nastavljanja DMC-ja. Poskusi na realni napravi so simulacijske rezultate zgolj potrdili. Je pa potrebno omeniti, da je pohitritev precej odvisna od razmerja časovne konstante s periodo vzorčenja. Pri relativno hitrih procesih, ni moč doseči tako očitne pohitritve.

Poleg pohitritve časa nastavljanja, smo s predlaganim postopkom skrajšali posnetek odziva na stopničasto vzbujanje, kar pripomore k manjši računski zahtevnosti DMC algoritma. Ta na začetku izračuna inverz matrike katere dimenzije so odvisne od dolžine posnetka, nato pa v vsakem koraku množi dve matriki, katerih dimenzije so prav tako odvisne od dolžine posnetka na stopničasto vzbujene.

Kaj pa če procesa ne poznamo dobro? V tem primeru lahko pomožni P-regulator načrtamo iz približnih parametrov, DMC algoritem pa bo celoten sistem pohitрил. P-regulator služi le hitrejšemu po-



Slika 3: Primerjava z uporabo zaščite pred integralnim pobegom in brez

snetku odziva na stopničasto vzbujanje.

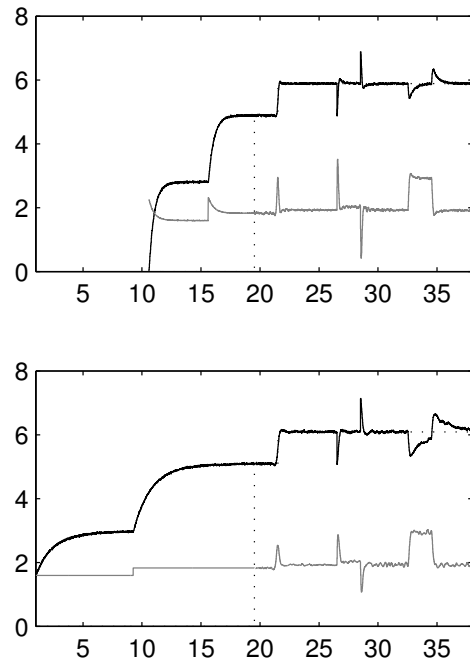
Glavna prednost predlaganega pristopa k samo-nastavljanju je torej krajši čas nastavitve algoritma vodenja in manjši, s tem povezani, stroški zagona, slabost pa potreba po poznavanju približnih parametrov modela procesa.

Zahvala

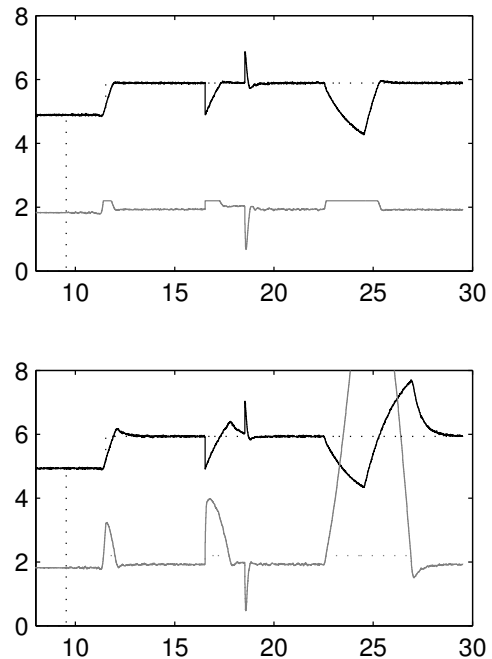
Kompetenčni center za sodobne tehnologije vodenja delno financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport ter Evropska unija (EU), in sicer iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] J. Richalet, A. Rault, J. Testud, J. Papon, Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes, *Automatica*, vol. 14, no. 5, pp. 413–428, 1978.
- [2] E. F. Camacho, C. Bordons, *Model predictive control*. Springer-Verlag London, 1988.
- [3] C. R. Cutler, A. Morshedi, J. Haydel, An industrial perspective on advanced control, AICHE annual meeting, (Washington, DC), 1983.
- [4] Z. Vukic, O. Kuljaca, *Lectures on PID Controllers*, 2002.



Slika 4: Primerjava samo-nastavljanja z dodatnim P-regulatorjem in brez na realni napravi



Slika 5: Primerjava z uporabo zaščite pred integralnim pobegom in brez na realni napravi