

Adaptivni inteligentni ventil

Aleš SVETEK, Damir VRANČIĆ, Samo KRANČAN, Zoran ŠAPONIA

Izveček: V prispevku predstavljamo novo generacijo električnih pogonov za ventile, v katere smo vgradili možnost avtonomnega zmanjševanja oscilacij v regulacijskih zankah. Algoritem ventila sestavljata dva podsklopa, in sicer detektor oscilacij in algoritem za prilagajanje dinamičnega ojačenja ventila. Oscilacije v sistemu zmanjšamo z nižanjem dinamičnega ojačenja ventila. Algoritem smo testirali simulacijsko z orodjem Matlab-Simulink, realni ventil z vgrajenim algoritmom pa smo testirali v simuliranem okolju »hardware-in-the-loop« ter na realni testni progi. Rezultati vseh testiranj so pokazali, da vgrajeni algoritem učinkovito zmanjšuje oscilacije v sistemu.

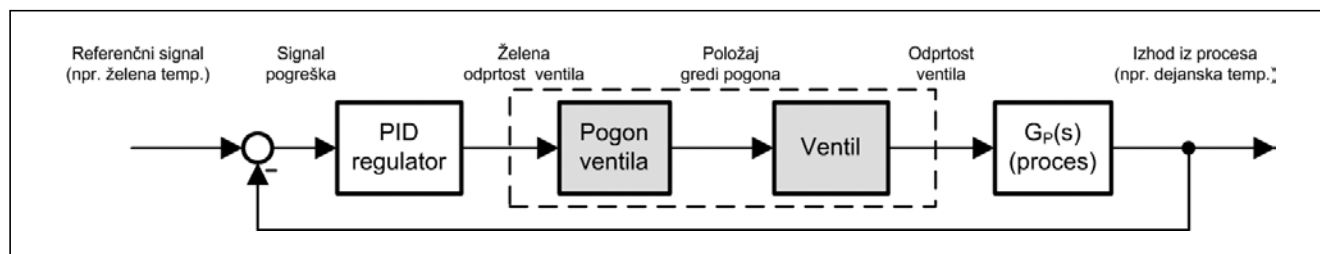
Ključne besede: pogon za ventile, regulacija, adaptivni sistem, zmanjševanje oscilacij

1 Uvod

Ventile uporabljamo kot izvršne člene v številnih regulacijskih zankah pri vodenju procesov v industriji,

Zaradi neustrezno nastavljenih parametrov regulatorjev, histereze ventila, nelinearnosti procesa ter neenakomernih obtežitve sistema (npr. razlika med zimskim in letnim režimom delovanja)

ta namen smo vgradili algoritem, ki spreminja dinamično ojačenje ventila v delovni točki takrat, ko zazna oscilacije v sistemu. Algoritem za zmanjševanje oscilacij, vgrajen v novo



Slika 1. Tipični zaprtozankni regulacijski sistem

sistemih HVAC in drugod (slika 1). Za spreminjanje odprtosti ventila uporabljamo pogon za ventil. Električni pogon je sestavljen iz elektronskega vezja, ki krmili motor, ta pa prek zobniškega prenosa pomika gred pogona, ki je neposredno povezana z ventilom (slika 2).

lahko prihaja do nihanj (oscilacij) v zaprtozanknem regulacijskem sistemu. Oscilacije povzročijo neželjeno obrabo mehanskih delov na pogonu in ventilu, kar je posledica povečanega števila mehansko izvedenih ciklov pogona ventila. Zaradi obrabe lahko pride do odpovedi delovanja pogona ali ventila, ki je povezana s stroški nakupa novega pogona ali ventila, servisiranja ali celo začasne ustavitve sistema.

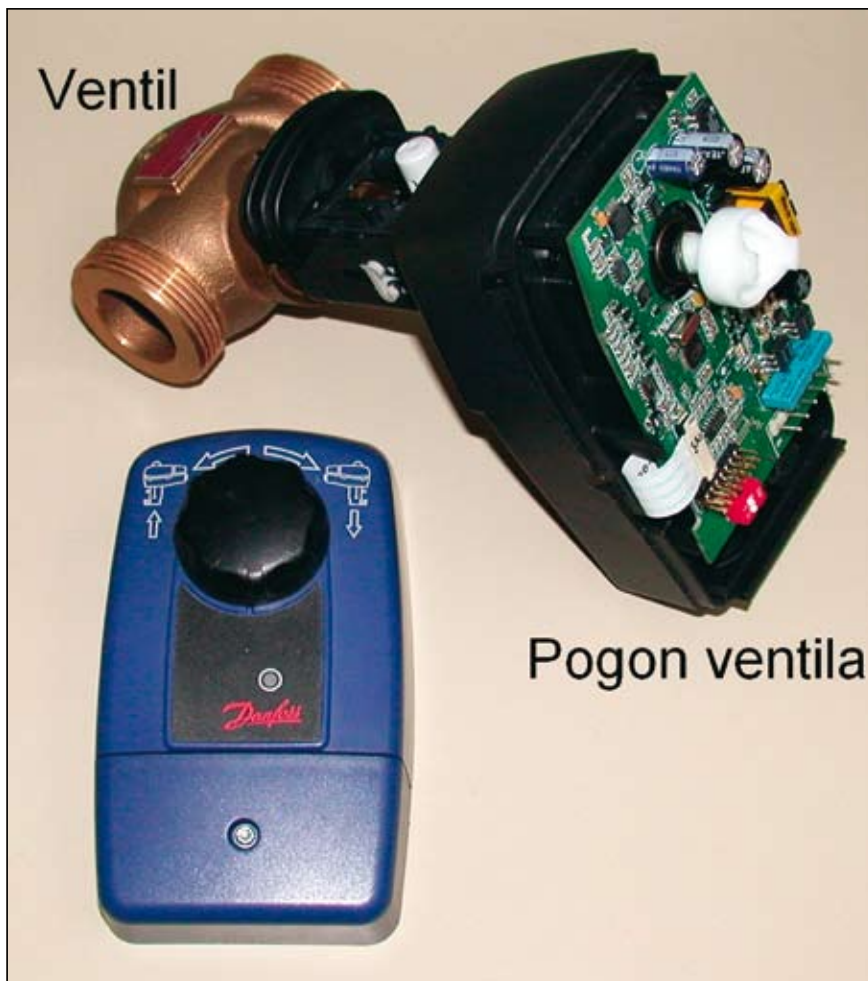
Da bi se izognili ali zmanjšali omenjene težave, smo razvili novo serijo električnih pogonov za ventile. V pogon ventila smo vgradili funkcijo avtonomnega zmanjševanja omenjenih oscilacij v zaprtozanknem sistemu. V

generacijo Danfossovih ventilov, smo poimenovali »inteligentni ventil«, ki ga bomo v tem prispevku tudi podrobneje opisali. Uvodu sledi drugo poglavje, v katerem opisujemo možne pristope za zmanjševanje oscilacij. V tretjem poglavju bomo razložili princip delovanja algoritma »inteligentni ventil«. V četrtem poglavju bomo predstavili rezultate preizkusov delovanja, v petem pa podali sklepne ugotovitve.

2 Pristopi za zmanjšanje oscilacij

Osnovna predpostavka, iz katere smo izhajali pri načrtovanju algoritma ventila za zmanjšanje oscilacij, je ta,

Mag. Aleš Svetek, univ. dipl. inž., doc. dr. Damir Vrančić, univ. dipl. inž., Institut Jožef Stefan, Ljubljana; Samo Krančan, Danfoss Trata, d. o. o., Zoran Šaponia, Danfoss Trata d.o.o.



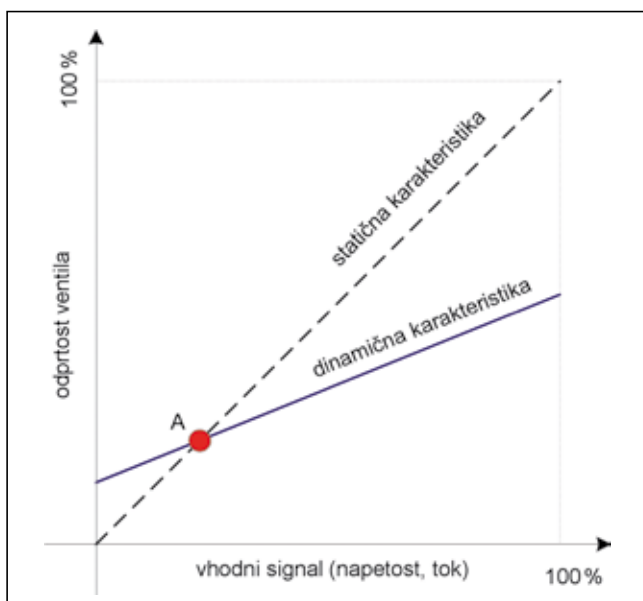
Slika 2. Tipični zaprtozančni regulacijski sistem

da imamo na voljo le krmilni signal ventila (izhod regulatorja). Nadzornemu sistemu ventila namreč ni dostopna informacija o referenčnem signalu regulatorja niti o izhodu iz procesa (slika 1), kar so sicer ključne informa-

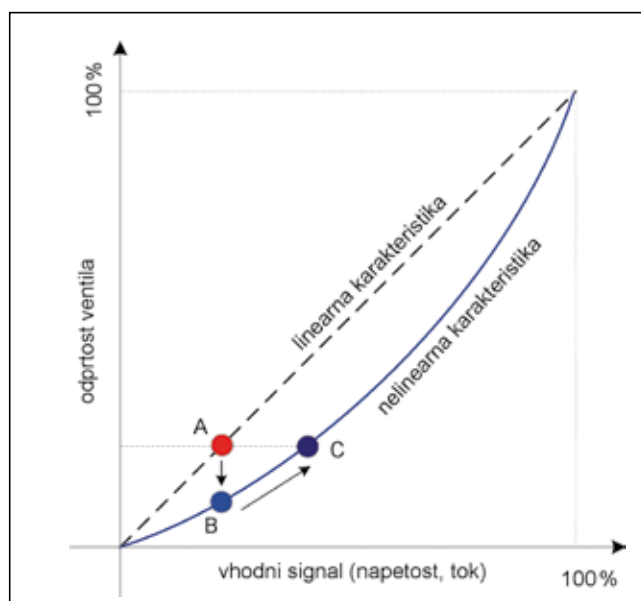
cije pri običajnih adaptivnih regulacijskih sistemih. Predlagani algoritem ventila tako spremlja le vhodni signal in na podlagi časovnega poteka tega signala ustrezno prilagaja ojačenje ventila.

Preučili smo več možnih pristopov za prilagajanje oz. zmanjšanje ojačenja ventila. Najenostavnejša možna rešitev je ta, da pri zaznani oscilaciji vhodnega krmilnega signala enostavno zmanjšamo ojačenje ventila (sprememba odprtosti ventila deljeno s spremembo krmilnega signala v ventil) v trenutni delovni točki in s tem spremenimo karakteristiko ventila. Ta pristop lahko ponazorimo s *sliko 3*. Skozi delovno točko A, ki predstavlja zahtevano odprtost ventila, potegnemo bolj položno krivuljo od prvotne. S spremembo delovne točke ustrezno premikamo novo krivuljo in tako neodvisno spreminjamo dinamično ojačenje ventila v različnih področjih delovanja. Slabost te rešitve je ta, da ventila ne moremo hipoma zapreti ali odpreti, kar je iz varnostnih razlogov nujno potreben pogoj.

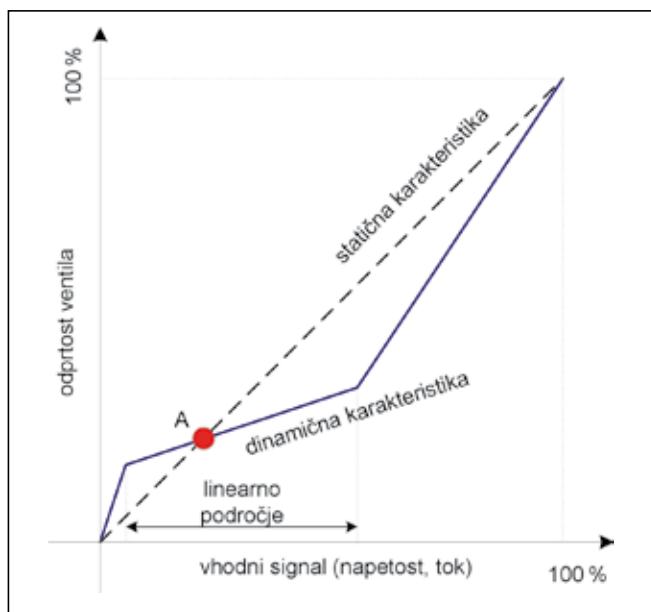
Druga možna rešitev za zmanjšanje ojačenja ventila je ta, da ventil spremeni statično karakteristiko iz linearne v nelinearno tako, da ima pri zaznani oscilaciji v delovni točki oz. pri določeni odprtosti manjše ojačenje (položnejšo karakteristiko), obenem pa ohrani obe skrajni točki (*slika 4*). Slabost tovrstne rešitve je v tem, da pri zaznanem oscilatornem vhodnem signalu pogona ventila (izhodni signal regulatorja na sliki 1) hipoma spremenimo delovno točko iz A v B, nato pa regulacijski sistem (regulator) šele po nekem času poskrbi, da pridemo



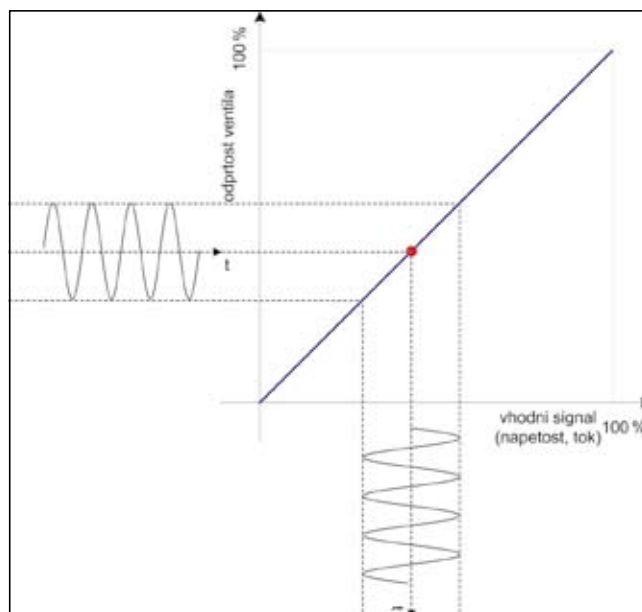
Slika 3. Zmanjšanje dinamičnega ojačenja ventila



Slika 4. Zmanjšanje statičnega ojačenja ventila



Slika 5. Kombinirani pristop za zmanjšanje dinamičnega ojačenja ventila



Slika 6a. Prikaz preslikave oscilacij iz vhoda na izhod ventila

nazaj v točko C (dejanska odprtost ventila postane enaka prvotni). Druga pomanjkljivost tovrstne rešitve je v tem, da z zmanjšanjem ojačenja v okolici točke C povzročimo zvišanje ojačenja v drugem delu vhodno-izhodne karakteristike.

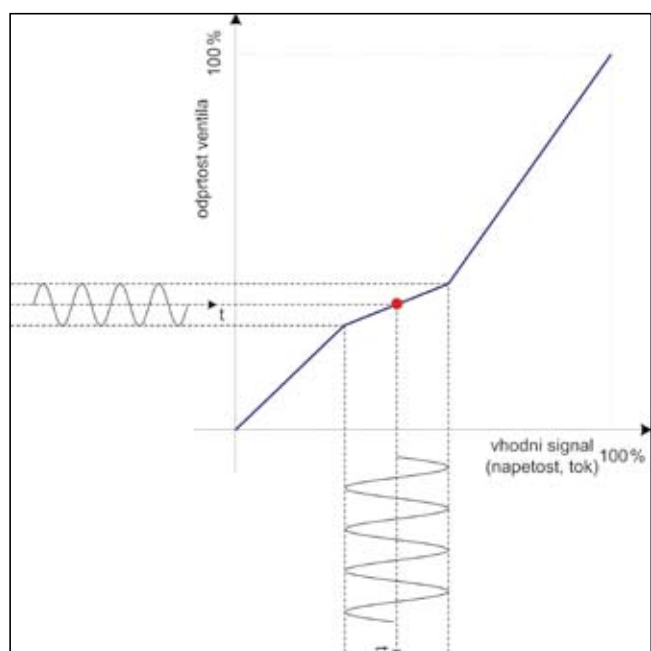
Tretja možna rešitev je kombinirani pristop, pri katerem spremenimo tako statično kot tudi dinamično karakteristiko ventila. Pripadajoča karakteristika je prikazana na *sliki 5*. V okolici točke, kjer zaznamo oscilaci-

je (»linearno področje«), zmanjšamo ojačenje ventila, pri tem pa zaradi varnosti ohranimo skrajni točki (popolna odprtost in zaprtost ventila). To rešitev smo tudi uporabili pri razvoju algoritma »inteligentni ventil«, ki je v nadaljevanju podrobneje opisan.

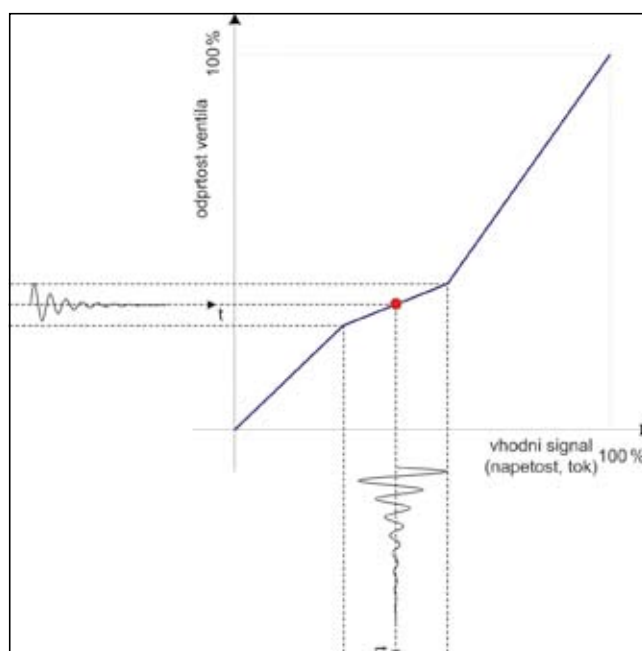
3 Algoritem »inteligentni ventil«

Delovanje algoritma »inteligentni ventil« lahko prikažemo s spodnjimi slikami. Na *sliki 6a* je prikazan pri-

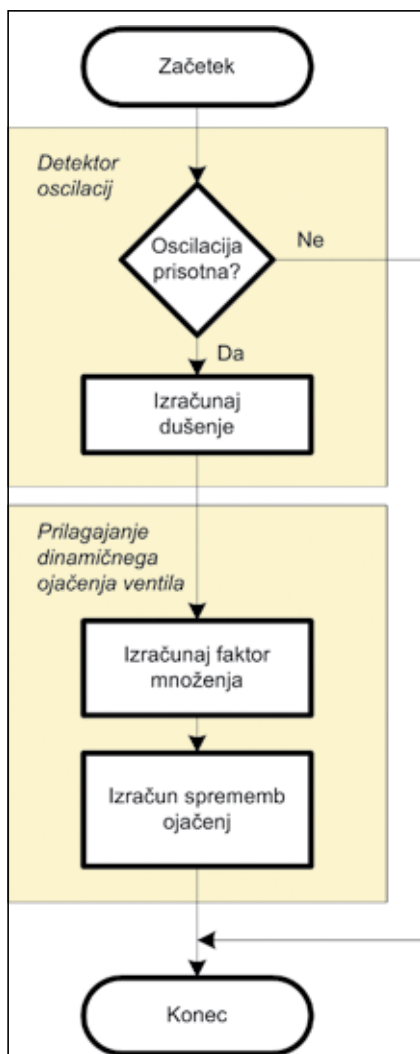
mer, pri katerem se v neadaptivnem regulacijskem sistemu pojavijo oscilacije. Oscilacije na vhodnem signalu pogona ventila se pri linearni karakteristiki ventila prenašajo na izhod (odprtost ventila) v polnem obsegu. Na *sliki 6b* je prikazan odziv ventila v odprtozračnem sistemu, pri katerem ventil z vgrajenim algoritmom »inteligentni ventil« detektira oscilacije in prilagodi ventilsko karakteristiko oz. zmanjša ojačenje okoli delovne točke. Pri tem se tako zmanjša nihanje odpiranja ventila. Z zmanjšanjem nihanja



Slika 6b. Prikaz zmanjšanja izhodnih oscilacij pri krmiljenju v odprti zanki ob zmanjšanju ojačenja ventila



Slika 6c. Prikaz zmanjšanja izhodnih oscilacij pri krmiljenju v zaprti zanki ob zmanjšanju ojačenja ventila



Slika 7. Principa delovanja algoritma »inteligentni ventil«

odpiranja ventila pa povečamo stabilnost zaprtozančnega vodenja, ker s tem zmanjšamo celotno ojačenje zaprtozančnega sistema. Slika 6c prikazuje rezultat delovanja ventila z vgrajenim algoritmom »inteligentni ventil« v povratnoznančnem sistemu, kjer je prišlo do stabilizacije sistema.

Algoritem »inteligentni ventil« je v grobem sestavljen iz dveh podsklopov:

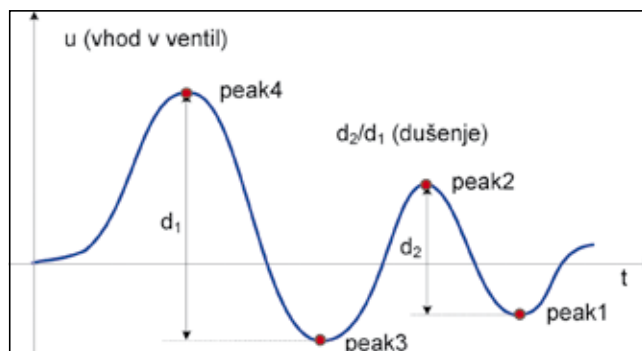
- 1) detektor oscilacij,
- 2) algoritem za prilagajanje dinamičnega ojačenja ventila.

Bločna shema algoritma je prikazana na sliki 7.

3.1 Detektor oscilacij

Detektor oscilacij spremlja vhodni signal in išče oscilacije v vhodnem

signalu. V prvem koraku pričemo z iskanjem pozitivnih in negativnih vršnih vrednosti. Ob znani oscilaciji izračunamo dušenje, ki je merilo za stopnjo oscilacije. Dušenje (angl.: decay ratio) smo definirali kot razmerje med zaporednimi vrhovi pri iznihavanju signala. Vrednost dušenja v naslednjem koraku uporabimo za določanje dinamičnega ojačenja ventila.



Slika 8. Ilustracija iskanja vrhov in izračuna dušenja

Ko smo detektirali zadostno število vrhov (4), izračunamo dušenje. Če si vrhovi ne sledijo časovno približno enakomerno, jih algoritem izloči. Na ta način dodatno izločimo zaznavanje vrhov signala, ki ga povzročajo naključne motnje v sistemu. Nato preverimo, če je razlika med zadnjima vrhovoma dovolj velika in če je število vrhov 4. Če so izpolnjeni vsi našeti pogoji, izračunamo dušenje

$$FD = \frac{d_2}{d_1} = \frac{peak1 - peak2}{peak3 - peak4} \quad (1)$$

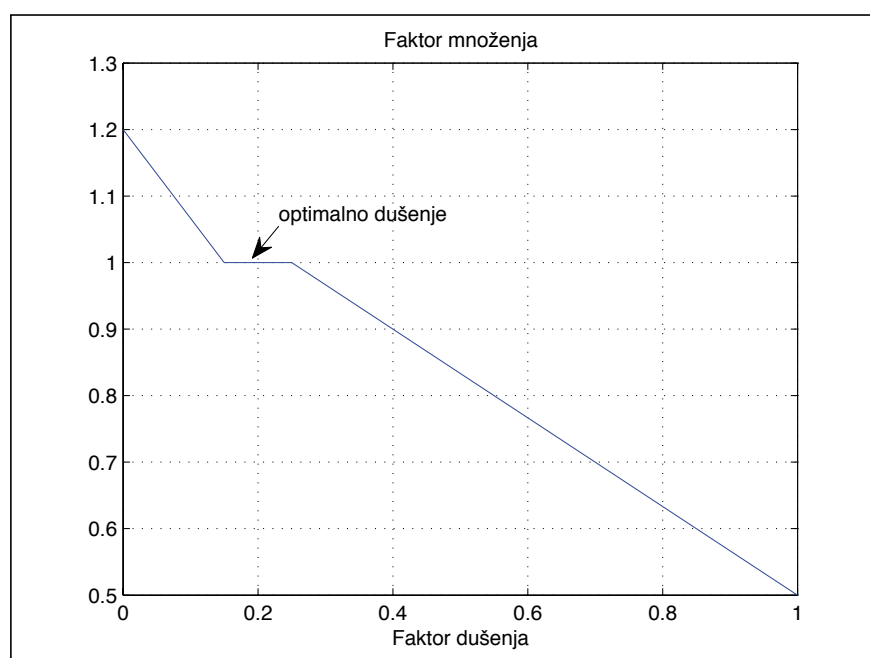
kjer je peak1 najnovejši vrh, peak4 pa najstarejši (slika 8).

Ko smo izračunali dušenje, ga posredujemo preostalemu delu algoritma, ki ustrezno prilagodi ojačenja ventila v posameznih delovnih točkah.

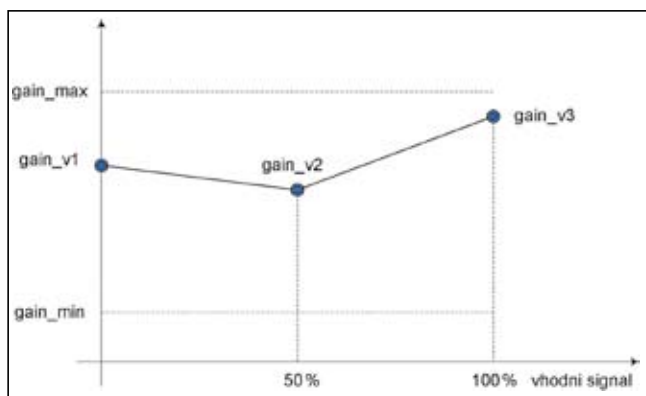
3.2 Algoritem za prilagajanje dinamičnega ojačenja ventila

Najprej je potrebno izračunati novo dinamično ojačenje ventila v trenutni delovni točki, nato pa izhodno vrednost (odprtost ventila) glede na vhodni krmilni signal.

Prilagoditev ojačenja (faktor, s katerim množimo dinamično ojačenje ventila v delovni točki) glede na izračunano vrednost dušenja, je prikazana na sliki 9. Za optimalno vrednost dušenja smo izbrali območje od 0,15 do 0,25. Če bo izmerjeno dušenje v tem območju, potem ne bomo spreminjali ojačenja ventila. Če izmerimo



Slika 9. Odvisnost faktorja, s katerim spreminjamo ojačenje ventila v delovni točki, od izračunane vrednosti dušenja (decay ratio)



Slika 10. Primer spremenjenega ojačenja ventila v treh delovnih točkah (0 %, 50 % in 100 %). Ojačenje v poljubni delovni točki se izračuna na osnovi interpolacije.

večje dušenje od 0,25 (bolj oscilatornen signal), potem znižamo ojačenje ventila v okolici točke, kjer smo zaznali oscilacije. V obratnem primeru (dušenje pod 0,15) pa bomo ojačenje zvišali.

Na kakšen način spreminjamo dinamična ojačenja v različnih delovnih točkah ventila? Delovno področje ventila je predstavljeno s tremi točkami, kot je prikazano na *sliki 10*. Tri točke predstavljajo ojačenje ventila pri 0-odstotni, 50-odstotni in 100-odstotni odprtosti ventila. Posamezna ojačenja nikoli ne morejo biti višja od parametra *gain_max* (npr. vrednosti 1) in nižja od *gain_min* (npr. vredno-

sti 0,2). Vrednost ojačenja ventila v poljubni delovni točki se izračuna na osnovi interpolacije med tremi podanimi točkami. Vzemimo primer, kjer so se pojavile oscilacije v okolici 40-odstotnega vhodnega signala. Ojačenje ventila je potrebno ustrezno zmanjšati. Najbolj v točki, ki je najbližja območju, kjer so se pojavile oscilacije, najmanj pa v najbolj oddaljeni točki. To lahko dosežemo tako, da uporabimo mehko (angl.: fuzzy) funkcijo, ki je prikazana na *sliki 11*. Na vodoravni osi je podano delovno območje ventila (skalirano na območje od 0 do 1 (0 % do 100 %)), na navpični osi pa je zelen faktor zmanjšanja ojačenja ventila. Največje zmanjšanje ojačenja (faktor 0,5 glede na prejšnje ojačenje) zahtevamo v delovni točki, kjer so se pojavile oscilacije (0,4 = 40 %), najmanjše (faktor 0,95) pa v najbolj oddaljeni točki (1 = 100 %). Ker zelena ojačenja ventila interpoliramo med tremi izbra-

nimi točkami, zmanjšanje ojačenja izračunamo le v omenjenih točkah. V našem primeru je faktor zmanjšanja ojačenja v točki 0 % okrog 0,9, v točki 50 % okrog 0,6 in v točki 100 % okrog 0,95. Z omenjenimi faktorji pomnožimo trenutne vrednosti ojačenj in dobimo rezultat, ki je prikazan na *sliki 12*. Opazimo, da so prvotna ojačenja ventila v treh točkah (modra barva) ustrezno spremenjena (rdeča barva). Najbolj je zmanjšana točka, ki je najbližje območju, kjer so se pojavile oscilacije (50 %), najmanj pa najbolj oddaljena točka (100 %).

Enačba mehke funkcije je:

$$F = 1 - \frac{1-k}{1+24(v-c)^2} \quad (2)$$

kjer je F faktor (zmanjšanja) ojačenja ventila, k faktor (zmanjšanja) ojačenja v območju, kjer so se pojavile oscilacije, c je delovna točka, v kateri je prišlo do oscilacij, in v delovna točka ventila (med 0 in 1).

4 Preizkus delovanja

Delovanje algoritma »inteligentni ventil« smo preizkusili v simulacijskem okolju in v praksi. Ventil z omenjeno inteligentno funkcijo smo sprva preizkusili na PC-platforni s simulacijo v programskem orodju Matlab-Simulink. Po uspešnih rezultatih simulacij smo testirali realni ventil v simuliranem okolju. PI-regulator in proces smo simulirali s prenosnim računalnikom in ju priklopili na ventil prek pretvornikov A/D in D/A (testiranje »hardware-in-the-loop«).

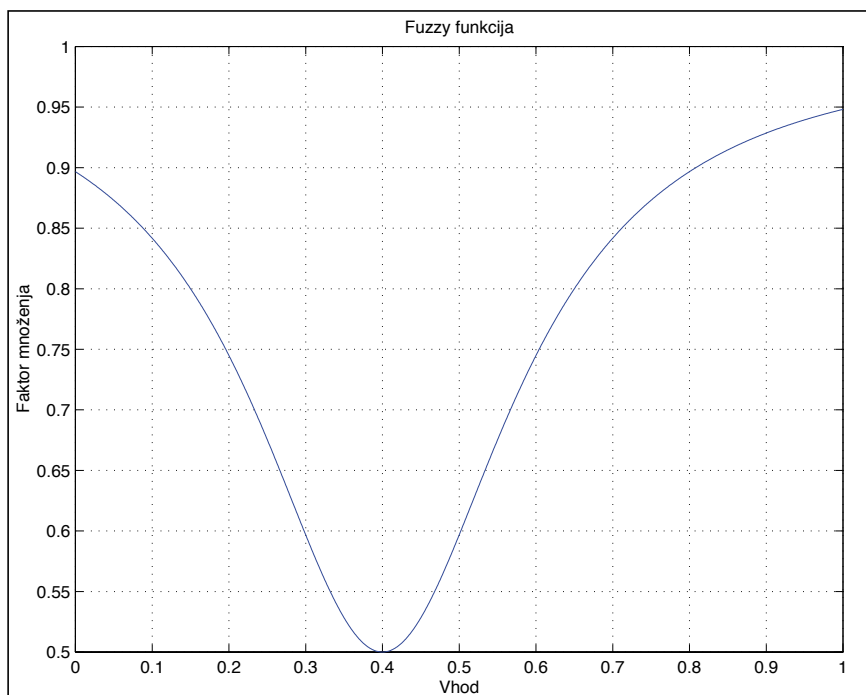
Izbrali smo PI-regulator:

$$G_R(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (3)$$

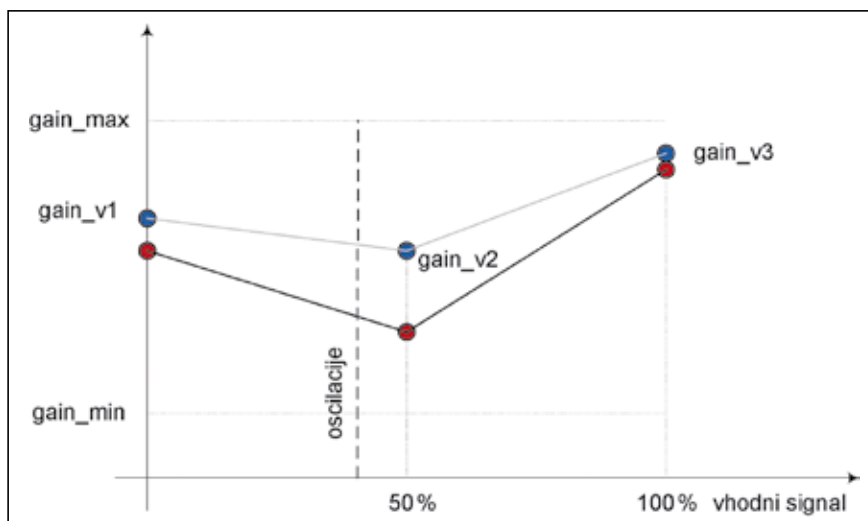
ki smo mu dodali zaščito pred integralnim pobegom in udarnim preklopom. Izbrani parametri regulatorja so bili naslednji:

$$\begin{aligned} K_p &= 1,6 \\ K_I &= 0,05 \end{aligned} \quad (4)$$

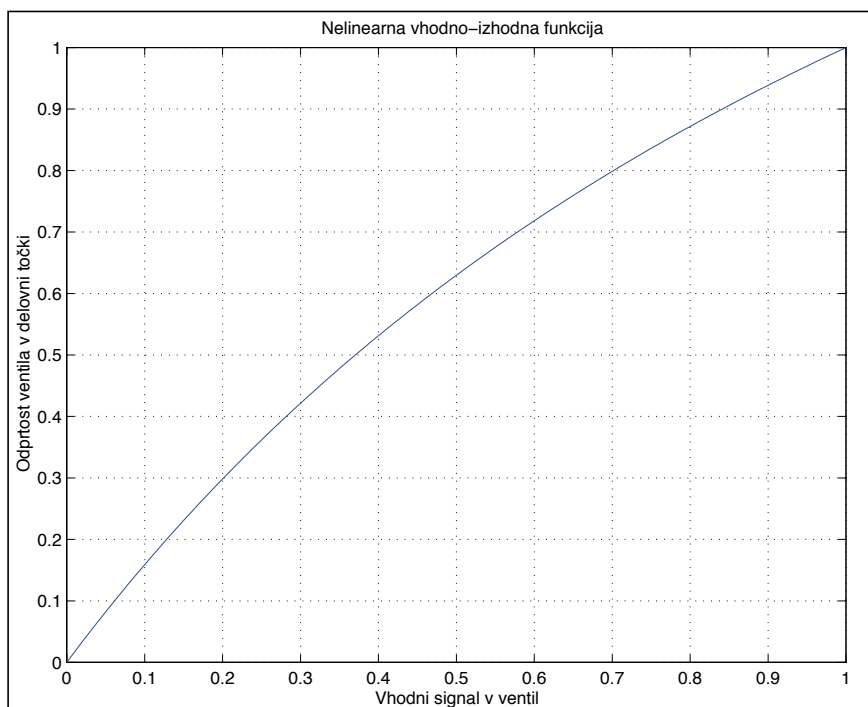
Izhod iz regulatorja smo prek pretvornika D/A pošiljali na vhodni signal ventila, dejansko pozicijo ventila pa smo brali prek pretvornika A/D in jo pošiljali na vhod v simulirani proces. Simulirani proces je imel naslednjo prenosno funkcijo:



Slika 11. Mehka funkcija, ki ponazarja odvisnost med faktorjem množenja ojačenja ventila od delovne točke ventila



Slika 12. Sprememba ojačenja ventila v treh delovnih točkah (0 %, 50 % in 100 %) glede na prejšnja ojačenja, če se pojavijo oscilacije v okolici 40-odstotne odprtosti ventila. Najbolj se zmanjša ojačenje v točki, ki je najbližja območju, kjer so se pojavile oscilacije.



Slika 13. Simulirana statična nelinearnost ventila

$$G_p(s) = \frac{e^{-8s}}{(1+8s)^2} \quad (5) \quad u = \frac{K_v x}{1-x(1-K_v)} \quad (6)$$

Uporabili smo torej proces drugega reda (pogosto pri sistemih ogrevanja) z zakasnitvijo 8 sekund (zakasnitev ogrevalne vode od ventila do prostora). Časovne konstante so nekoliko krajše od realnih (predvsem časovne konstante procesa) zato, da skrajšamo čas poizkusa.

Pred vhod v proces smo dodali še nelinearno funkcijo:

kjer je x vhodni signal ventila, u pa odprtost ventila. Uporabili smo konstanto $K_v = 1,7$. Funkcija nelinearnosti je prikazana na sliki 13. Nelinearnost smo namenoma dodali zato, da ugotovimo, ali bo funkcija »inteligentni ventil« pravilno zmanjšala ojačenje ventila samo v območju, kjer se pojavijo oscilacije. Kot je razvidno s slike 13, je ojačenje sistema višje v spodnjem delu območja.

Poizkus je potekal tako, da smo spreminjali delovno točko procesa (referenčno vrednost) s 3 na 5 in na 9 ter nazaj. Sprememba delovne točke je bila postopna (v časovnem obdobju 100 s). 300 s po spremembi delovne točke smo dodali motnjo na vhod v proces (pred nelinearnostjo). Najbolj običajen način vodenja procesov je namreč regulacijsko delovanje (izkrmiljenje motenj).

Slike 14 do 16 prikazujejo odziv procesa med poizkusi v enakih časovnih intervalih, kot so bili izbrani za prikaz pozicije ventila. Tu lahko opazimo, da je inteligentni ventil znatno prispeval k stabilizaciji zaprtozančnega sistema. Dejanski premik ventila je manjši od vhodnega signala zlasti v območjih, kjer je bil ventil veliko bolj oscilatoren. Ta razlika dejansko omogoča stabilizacijo zaprtozančnega regulacijskega sistema.

Rezultati vseh testov so pokazali, da pogon ventila deluje v skladu z načrtovanimi specifikacijami, zmanjšuje oscilacije v regulacijski zanki in jo s tem stabilizira.

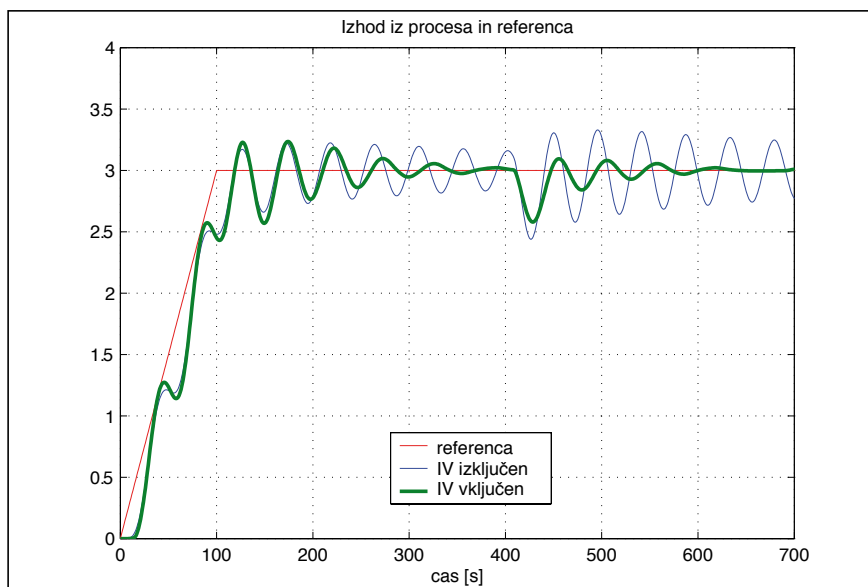
5 Zaključek

Za novo generacijo ventilov podjetja Danfoss Trata, d. o. o., smo razvili in vgradili algoritme, ki zmanjšujejo morebitne oscilacije v regulacijskem sistemu. Uporabili smo kombinirani pristop prilagajanja tako statičnega kot tudi dinamičnega ojačenja ventila.

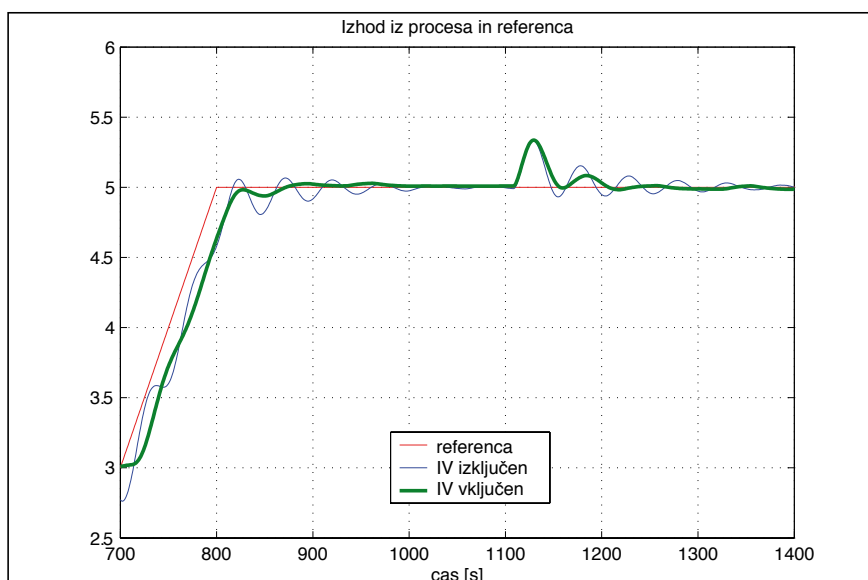
To funkcionalnost smo testirali simulacijsko, v simuliranem okolju »hardware-in-the-loop« ter na testni progji v podjetju Danfoss Trata, d. o. o. Vsi rezultati so pokazali, da razviti sistem uspešno zmanjšuje oscilacije in pomaga stabilizirati regulacijsko zanko. Končni rezultat so tako manjša obraba ventila, kvalitetnejša zaprtozančna regulacija in daljša življenjska doba sistema.

Viri

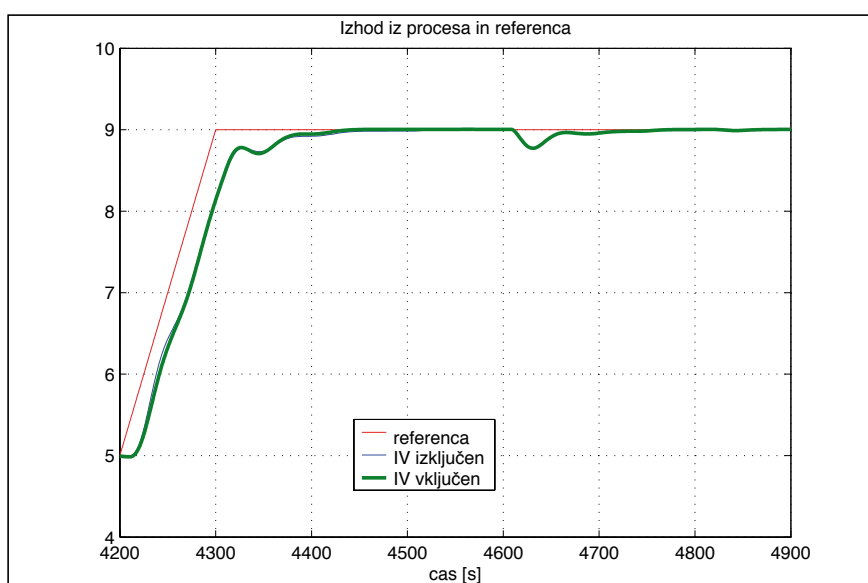
- [1] VRANČIČ, Damir, PETROVČIČ, Janko, SVETEK, Aleš, KRANČAN, Samo, ŠAPONIA, Zoran. Opis delovanja inteligentnega ventila



Slika 14. Začetek poizkusa na ventilu (spodnji del območja)



Slika 15. Prehod v srednji del območja ventila



Slika 16. Prehod na zgornji del območja ventila

za model AME 335, (IJS delovno poročilo, 10181), Institut Jožef Stefan, Ljubljana 2009.

[2] DONLAGIČ, Dali. Krmilni ventili, Maribor, 1996

An adaptive intelligent valve

Abstract: The article presents a new control valve aimed at reducing oscillations in a closed-loop system. The valve consists of an oscillation detector and a gain adaptation block. The oscillations in the system are reduced by reducing the valve's dynamic gain. The valve was tested in the Matlab-Simulink environment, on a process simulated by "hardware-in-the-loop" and on a real laboratory setup. The results showed that the new valve can efficiently reduce the oscillations in the system.

Keywords: valve drive, regulation, adaptive system, oscillation reduction



Danfoss Trata d.o.o.

VENTIL

REVUIA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

telefon: + (0) 1 4771-704
 telefaks: + (0) 1 4771-761
<http://www.fs.uni-lj.si/ventil/>
 e-mail: ventil@fs.uni-lj.si