

Programski moduli za sintezo naprednih algoritmov vodenja

Gregor JANC, Matic GOLOB, Damir VRANČIČ, Martin BLAZINŠEK

Izvleček: Regulacijski algoritmi v procesni industriji igrajo pomembno vlogo pri vodenju procesov. Proizvajalci procesne opreme večinoma že sami ponujajo nabor regulacijskih blokov, pri čemer gre največkrat za različne izvedbe regulatorjev PID, ki pa imajo večinoma številne omejitve. Klasični PID-regulatorji ne spadajo med najučinkovitejše za vodenje procesov z velikim mrtvim časom. Vodenje tovrstnih procesov je možno izboljšati s Smithovim prediktorjem. Ročno ugaševanje regulatorjev je običajno časovno potratno zaradi velikega števila poskusov na procesu. Hitrost in kakovost ugaševanja pa izboljša funkcija avtomatskega ugaševanja parametrov regulatorja.

Ključne besede: regulacija, PID-regulator, Smithov prediktor, PPCT-samougaševanje, vodenje procesa, Simatic S7, OPC, WinCC, PLK

1 Uvod

Regulacijski algoritmi igrajo v procesni industriji pomembno vlogo [1, 2]. Proizvajalci procesne opreme praviloma ponujajo programirljive logične krmilnike (PLK) z vgrajenimi regulacijskimi bloki. Največkrat gre za različne izvedbe regulatorjev tipa PID (proporcionalno – integrirno – diferencirno delujoči regulatorji), ki pa imajo pogosto tudi določene omejitve. V prispevku smo opisali dva regulacijska bloka, ki predstavljata pomembno funkcionalno razširitev glede na klasične regulacijske bloke, ki jih zasledimo v industrijski regulacijski opremi.

Razvita regulacijska bloka imata številne napredne funkcije: upoštevaje amplitudnih in hitrostnih omejitev aktuatorjev pri izračunu izvedljivih regulirnih signalov, napredna zaščita pred integralnim

pobegom, brezudarni preklon ročno-avtomatsko, filtri referenčnih in izhodnih signalov, enostavno sestavljanje blokov v kaskadne strukture in avtomatsko ugaševanje z uporabo orodja PPCT. Pri procesih brez mrtvega časa se učinki razvitih regulacijskih blokov odražajo predvsem v manjšem prevzponu, do katerega pride zaradi delovanja integralske zaščite ali preklopa ročno-avtomatsko. Tudi do dvakrat se skrajša umiritveni čas pri procesih z mrtvim časom. Vse skupaj se odraža v hitrejšem in robustnejšem vodenju procesov. S pomočjo avtomatskega ugaševanja pa postane proces parametriranja regulatorjev tudi preprostejši.

2 Implementacija algoritmov na platformi Siemens S7

Zaradi omejitev obstoječih regulacijskih blokov na strojni opremi Siemens S7 smo se odločili implementirati regulacijska bloka modificiranega PID-regulatorja (regulacijska struktura je prikazana na *sliki 1*) in Smithovega prediktorja (bločna shema je prikazana na *sliki 2*), ki so ju razvili partnerji iz Instituta Jožef Stefan (IJS) in Fakultete za elektro-

tehniko Univerze v Ljubljani (FE-UL). Za potrebe testiranja delovanja in nastavljanja je bil razvit uporabniški vmesnik SCADA WinCC, ki združuje grafični prikaz, arhiviranje in trende.

Regulacijska bloka (modificirani PID, Smithov prediktor) omogočata avtomatsko nastavljanje parametrov (autotuning) s pomočjo orodja PPCT, ki so ga razvili na FE-UL [3, 4].

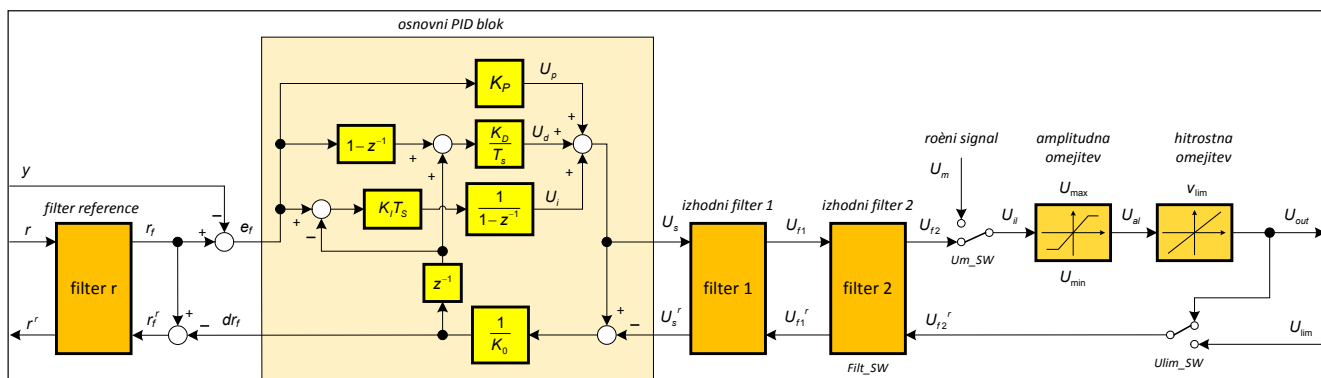
Sintezo naprednih regulacijskih blokov smo temeljili na algoritmih, ki so jih na Odseku za sisteme in vodenje na IJS že preskusili na PC-platforni [5, 6]. Realizacija algoritmov na krmilniku je zahtevala pretvorbo algoritmov iz okolja Matlab v programski jezik C ter nekatere dopolnitve, ki so specifične za PLK-krmilnike (definicija registrov, vzorčenje, prekinitvene rutine in izdelava regulacijskega bloka).

2.1 Priprava testnega okolja

Na PLK-platforni Siemens S7 smo pripravili testno okolje, ki zajema:

- strojno opremo (HW) s PLC Siemens S7-300,
- programsko opremo (SW):

Gregor Janc, univ. dipl. inž., Matic Golob, univ. dipl. inž., oba Kolektor Sinabit, d. o. o., Ljubljana, Damir Vrančič, univ. dipl. inž., Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Martin Blazinšek, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko



Slika 1. Bločna shema modificiranega PID-regulatorja

- o orodje za programiranje programabilnih logičnih krmilnikov (PLK) – Simatic Step 7,
- o orodje za izdelavo vmesnika SCADA – Wincc,
- o OPC strežnik Keepware KEP-ServerEX.
- večjezičnost,
- avtorizacija na nadzornem sistemu,
- arhiviranje podatkov.

Za potrebe testiranja delovanja regulacijskih algoritmov vodenja je bil razvit uporabniški vmesnik, ki omogoča spreminjanje parametrov regulatorja in spremljanje njihovega vpliva na obnašanje regulatorja. Vse ključne veličine se tudi arhivirajo, tako da je možen tudi pregled preteklih poskusov in odzivov.

2.2 Simatic Wincc vmesnik

Simatic Wincc predstavlja napredno programsko orodje za izdelavo nadzornega sistema SCADA.

Osnovne funkcionalnosti orodja so naslednje:

- zajem vrednosti točk (tagov) iz podatkovnih blokov (DB-datablocki) preko gonilnika SIMATIC S7 PROTOCOL SUITE,
- izdelava ekranskih slik,
- alarmiranje,
- programiranje skript v jeziku VBS in C,

Bistven pri ocenjevanju delovanja regulatorja je časovni potek signalov, ki ga lahko spremljamo preko trendnega okna.

2.3 OPC-Strežnik

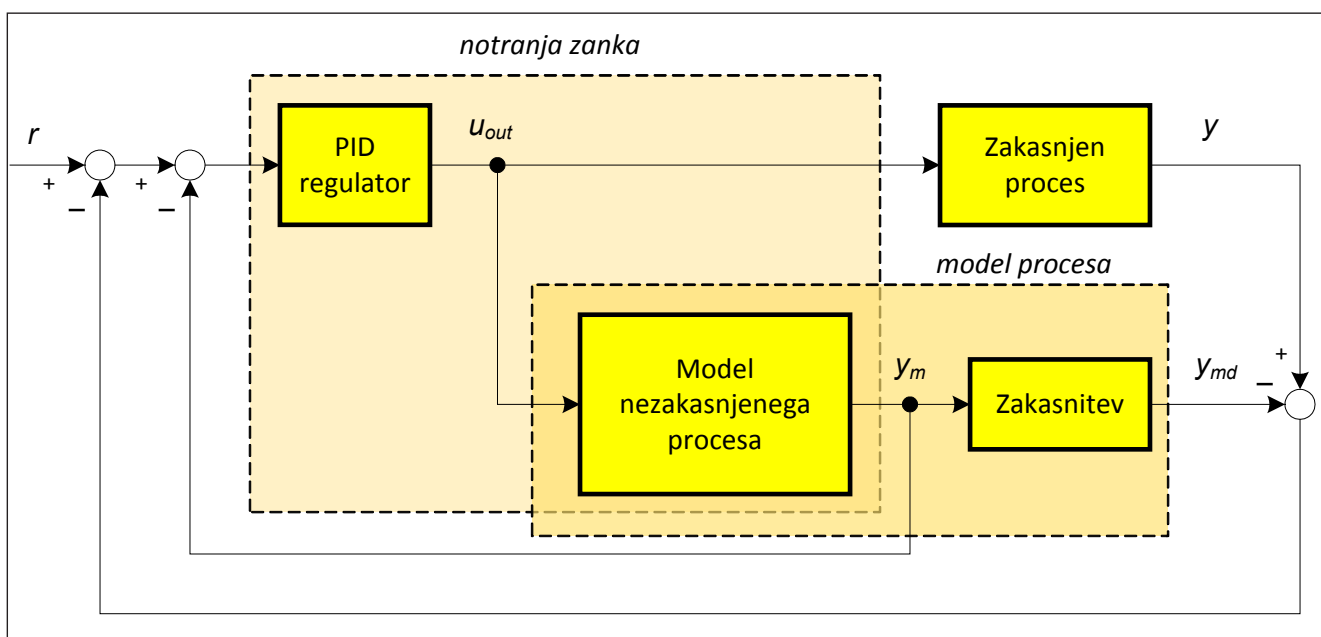
OPC-strežnik preko gonilnikov zajema vrednosti spremenljivk (tagov)

na krmilniku in jih daje na razpolago različnim aplikacijam, ki nastopajo v vlogi OPC-klienta. V našem primeru je bil OPC-strežnik uporabljen za potrebe komunikacije z aplikacijo PPCT, ki omogoča samodejno nastavljanje (autotuning) parametrov regulatorja.

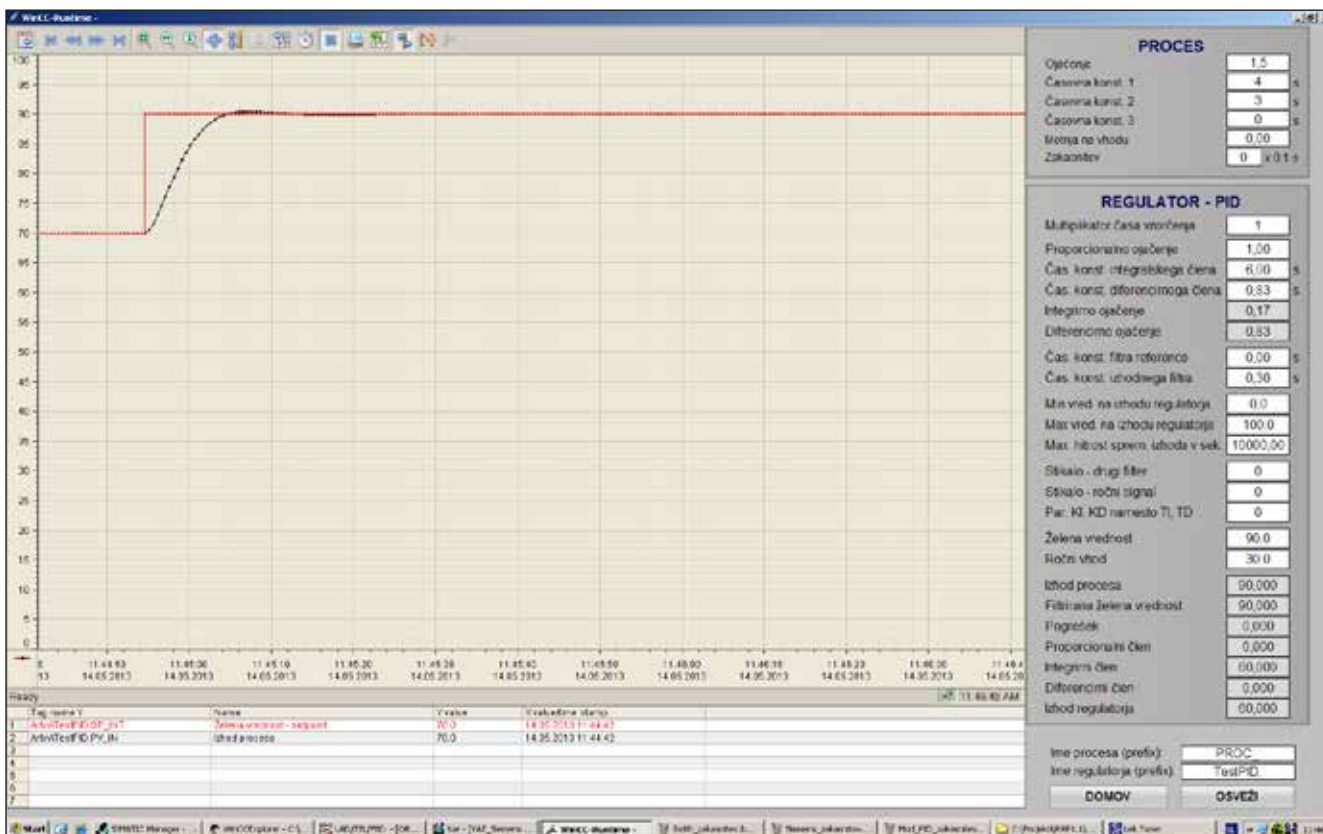
Uporabili smo OPC-strežnik Keepware KEPServerEX. Najprej smo konfigurirali napravo, iz katere se berejo signali, in nato dodali dostope do posameznih spremenljivk s pripadajočimi krmilniškimi naslovi.

2.4 Procedure regulacijskih algoritmov

Regulacijska algoritma za blok modificiranega PID-regulatorja in Smithovega prediktorja sta sestavljena iz posameznih pomožnih procedur, ki jih nato kliče glavna procedura.



Slika 2. Bločna shema Smithovega prediktorja – vsebuje PID-regulator in model procesa s čisto zakasnitvijo



Slika 3. Uporabniški vmesnik SCADA za nastavitve parametrov procesa in regulatorja

Izvorna koda vseh regulacijskih procedur je bila sprogramirana v okolju S7-SCL, kjer je bila nato prevedena v funkcijske bloke (FB). Obstajata dva glavna funkcijska bloka, in sicer FB900 PID (PID-regulator) in FB910 SMITH_PREDIK (Smithov prediktor). Slednjima pripadata ustrezna bloka tipa Instance DB, ki predstavljata podatkovni del regulatorjev s pripadajočimi spremenljivkami.

Regulacijska bloka sta klicana znotraj cikličnega prekinitvenega (interrupt) bloka OB35, kar je prvi pogoj za pravilno delovanje algoritma, saj mora biti perioda med posameznimi klici regulatorja konstantna. Klici blokov in ostalo periferno programiranje je izvedeno v programskem jeziku LADDER (lestvični diagram), ki je v praksi precej razširjen, saj

omogoča dober pregled nad izvajanjem programa in enostavno razhroščevanje.

3 Testiranje algoritmov na Siemens S7

3.1 Testno okolje

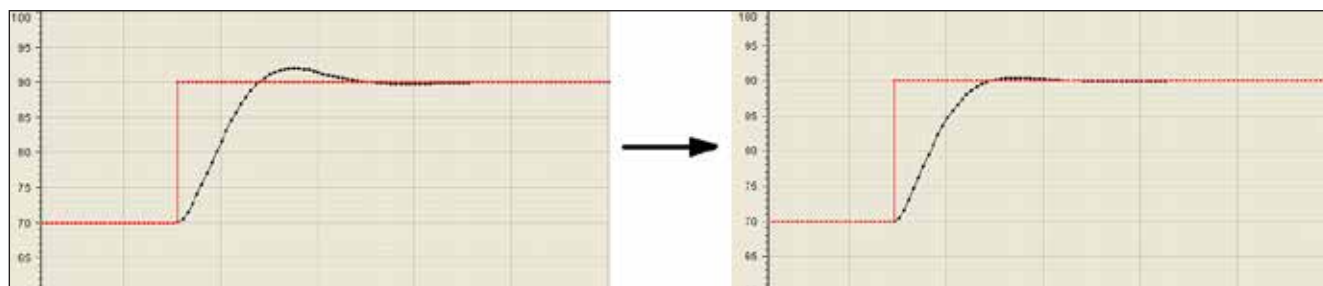
Za potrebe testiranja implementiranih regulacijskih blokov smo uporabili Siemensove splošne knjižnice, ki med naborom različnih funkcij ponujajo tudi simulacijo procesa tretjega reda. Funkcijski blok procesa ima nastavljive časovne konstante, ojačenje, motnjo in čisto zakasnitev. Na ta način smo lahko razvita regulatorja testirali na različnih procesih. Vsi bistveni parametri regulatorja so nastavljivi kar neposredno iz

uporabniškega vmesnika, istočasno pa je omogočeno tudi spremljanje vseh vhodnih in izhodnih spremenljivk. Uporabniški vmesnik je prikazan na sliki 3. Na njej so prikazani odzivi procesa, model procesa in vsi parametri regulatorja.

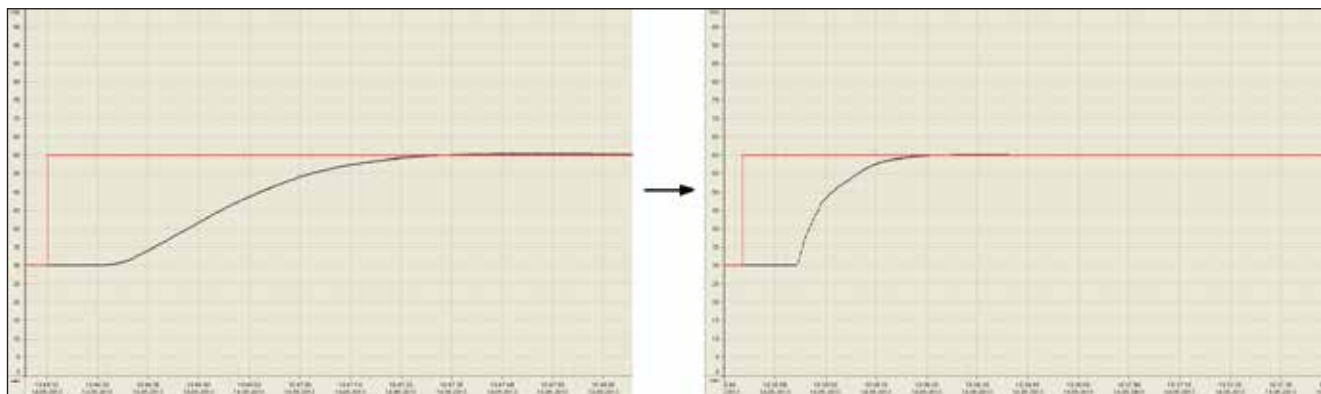
Na podlagi odzivov modificiranega PID-regulatorja in Smithovega prediktorja je bila narejena primerjava z vgrajenim Siemensovim PID-regulatorjem FB41 CONT_C, ki je v standardni Siemensovi knjižnici.

3.2 Testiranje PID-regulatorja

Testiranje bloka FB900 PID je bilo izvedeno na platformi Siemens Step7, časovne poteke signalov pa smo



Slika 4. Odziv procesa pred uporabo (levo) in po uporabi (desno) modificiranega PID-regulatorja



Slika 5. Odziv procesa pred uporabo (slika levo) in po uporabi (slika desno) Smithovega prediktorja

zajemali in prikazovali na uporabniškem vmesniku Wincc (glej *slika 3*).

Testiranje je bilo izvedeno na različnih procesih, pri čemer se je delovna točka spreminjala skozi celotno področje delovanja.

Prednosti razvitega PID-regulatorja pred klasičnim Siemensovim regulatorjem so naslednje:

- upoštevanje omejitev aktuatorjev (amplitudna in hitrostna), na podlagi katerih se izračunavajo izvedljivi signali,
- napredna zaščita pred integralnim pobegom,
- ustrezen preklop ročno-avtomatsko,
- filtri reference in izhodnih signalov,

- struktura PID-regulatorja, ki z izračunom povratne izvedljive reference omogoča zaporedno zlaganje regulatorjev v kaskadne strukture z optimalno zaščito pred integralnim pobegom in preklpom med ročnim in samodejnim načinom vodenja, ter
- samouglaševanje preko orodja PPCT.

Bistvena slabost klasičnega Siemensovega regulatorja je neučinkovita zaščita pred integralnim pobegom – v primeru omejitev namreč regulator zadrži vrednost integrirnega (I) člena, namesto da bi ga prilagajal glede na razliko med omejenim in neomejenim izhodom iz regulatorja. To lahko povzroči prenehaje ali podnihaje takrat, ko signal na izhodu iz

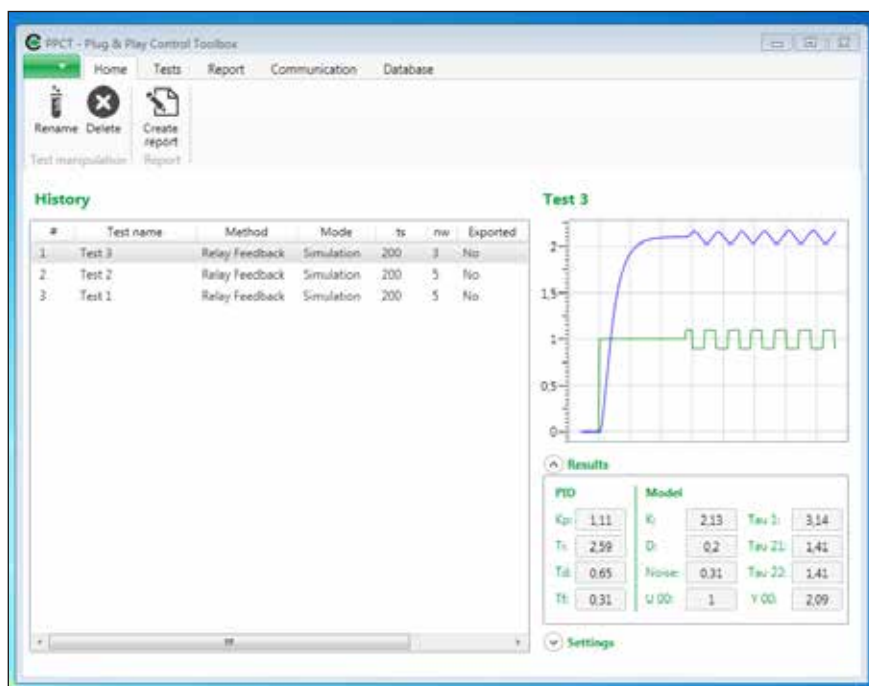
regulatorja ni več omejen. Najbolj opazni učinki novega PID-bloka so tako vidni pri omejenih signalih na izhodu iz regulatorja, ko pri razvitem PID-regulatorju dobimo manjše prevzpone kot pri Siemensovem PID-regulatorju (glej *slika 4*).

Prednost razvitega PID-regulatorja pa je tudi v tem, da omogoča optimalno zlaganje večih regulatorjev v kompleksnejše strukture, kot so na primer kaskadne vezave na enak način, kot bi zlagali LEGO kocke. Klasični regulatorji imajo namreč to pomanjkljivost, da omejitve signala notranjega regulatorja ne moremo ustrezno prenesti na zunanji regulator. Predlagana struktura pa izračunava ustrezne omejene signale, ki jih lahko nato vodimo na naslednji regulator v verigi. Tako lahko sestavimo poljubne regulacijske strukture s samodejno zaščito pred integralnim pobegom in udarnim preklpom.

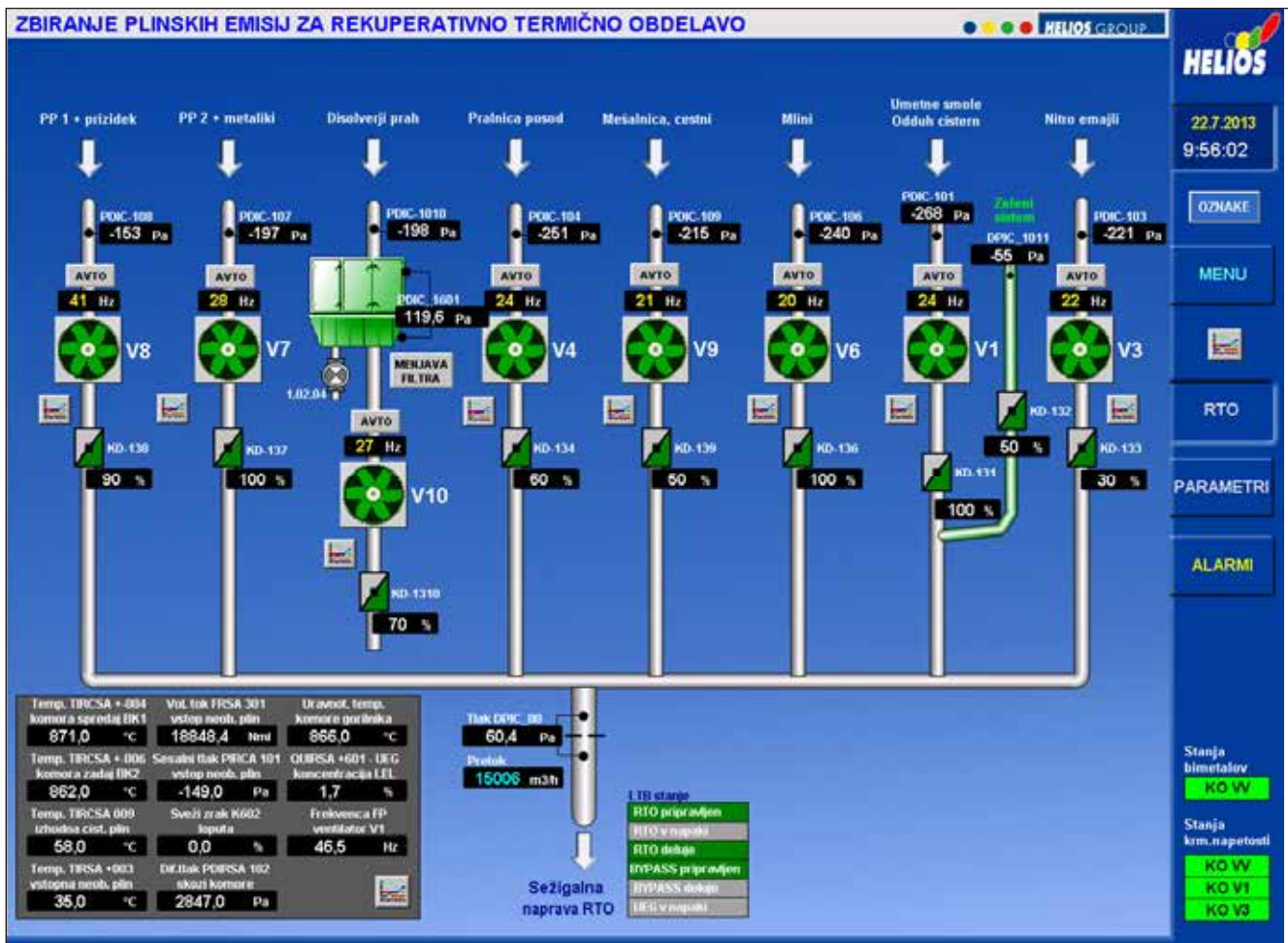
3.2.1 Testiranje Smithovega prediktorja

Testiranje bloka FB910 SMITH_PREDIK je bilo izvedeno na platformi Siemens Step7, časovni poteki signalov pa so se zajemali in prikazovali na uporabniškem vmesniku Wincc. Testiranje je bilo izvedeno na različnih procesih in v različnih delovnih točkah.

Blok FB910 SMITH_PREDIK temelji na modificiranem PID-regulatorju, ki smo ga nadgradili z identificiranim modelom procesa in tako izvedli Smithov predictor (glej *slika 2*). Posledično vsebuje vse prednosti bloka FB900 PID, vključno z zašči-



Slika 6. Okno orodja za identifikacijo procesa in samodejno nastavljanje parametrov regulatorja – PPCT



Slika 7. Okno vmesnika SCADA za vodenje sistema odsesavanja za rekuperativno termično obdelavo

to pred integralnim pobegom in udarnim preklopom ter modularno strukturo, ki omogoča neposredno implementacijo v kompleksnejše regulacijske strukture. Bistvena prednost Smithovega prediktorja pa se izkaže pri regulaciji procesov z velikim mrtvim časom, ko postanejo klasični PID-regulatorji praktično neuporabni.

Z uporabo Smithovega prediktorja lahko tudi do dvakrat skrajšamo umiritveni čas, s tem pa hitrejši in učinkovitejši vodenje procesov. Primer vodenja s Smithovim prediktorjem je prikazan na sliki 5, kjer lahko opazimo veliko hitrejši odziv sistema s Smithovim prediktorjem kot pri PID-regulatorju. Struktura Smithovega prediktorja namreč omogoča, da parametre PID-regulatorja v Smithovem prediktorju nastavimo za proces brez časovne zakasnitve. Tako lahko uporabimo višja ojačenja regulatorja in s tem dosežemo učinkovitejšo sledilno kot tudi regulacijsko vodenje zakasnenih procesov.

Smithov prediktor je na področju procesne industrije tako rekoč inovacija, saj ga na PLK-platformah praviloma ne srečamo.

3.2.2 Samonastavljivi regulatorji

3.2.2 Samonastavljivi regulatorji

S sodelavci FE-UL je bila v sklopu razvoja orodja za identifikacijo procesa in samodejno nastavljanje parametrov regulatorjev (PPCT) razvita komponenta za povezljivost orodja z razvitimi regulacijskimi bloki. Razvita komponenta omogoča identifikacijo procesa s pomočjo relejnega preskusa, nakar se izračunani parametri preko OPC-vmesnika prenešajo na krmilnik.

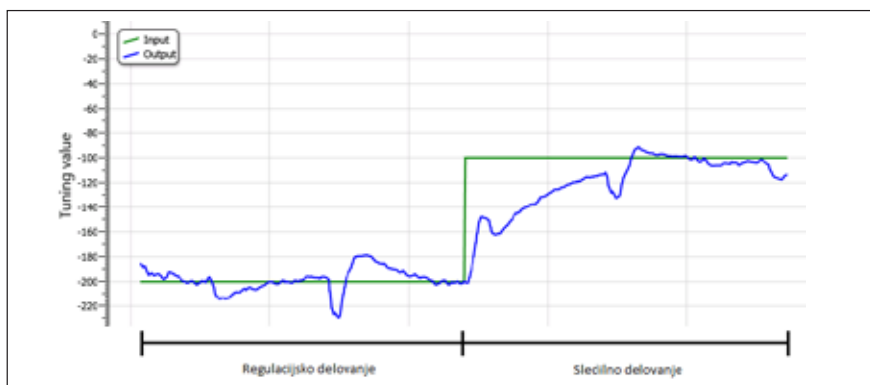
Oba razvita regulacijska bloka sta v splošnem zasnovana tako, da omogočata preprosto povezovanje na orodje PPCT in s tem enostavno, ča-

sovno nepotratno in učinkovito nastavljanje parametrov regulatorjev. Primer videza PPCT-orodja je prikazan na sliki 6. Tu je prikazan primer poskusa na procesu, pri katerem dobimo parametre procesa s pomočjo relejnega poskusa. Na desni strani pod odzivi so prikazani tako parametri procesa kot tudi predlagani parametri PID-regulatorja.

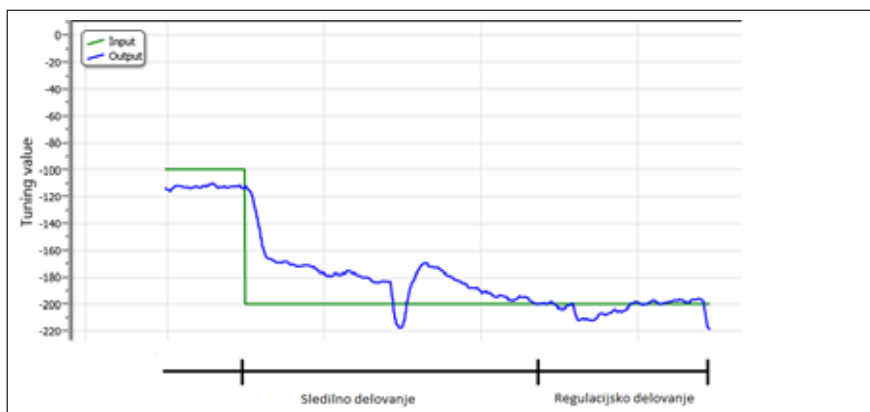
3.3 Preskus PID-bloka na realnem procesu

3.3.1 Opis procesa

Razviti blok FB900 PID je bil implementiran v podjetju Helios na sistemu za zbiranje plinskih emisij za rekuperativno termično obdelavo (RTO). Gre za sistem termične oksidacije oziroma sežigalnice plinov, ki je sestavljen iz same naprave RTO in povezovalnih cevovodov med napravo ter izvori emisij. Posamezne veje cevovoda služijo za odsesavanje emisij iz pripadajočih oddelkov,



Slika 8. Referenčni tlak (zeleno) in dejanski tlak (modro) pri uporabi klasičnega PID-regulatorja



Slika 9. Referenčni tlak (zeleno) in dejanski tlak (modro) pri uporabi klasičnega PID-regulatorja

pri čemer se ti delijo na podveje in lokalne zajeme za odsesavanje. Vsaka veja ima svoj ventilator, ki je napajan preko frekvenčnega pretvornika. Cilj zbirnega sistema je učinkovita regulacija absolutnega tlaka v posamezni veji. Na vrednost tlaka vpliva mo s hitrostjo vrtenja ventilatorjev, pri čemer je naloga dokaj zahtevna, saj so motnje, ki prihajajo iz lokalnih podvej izvorov emisij, precej velike.

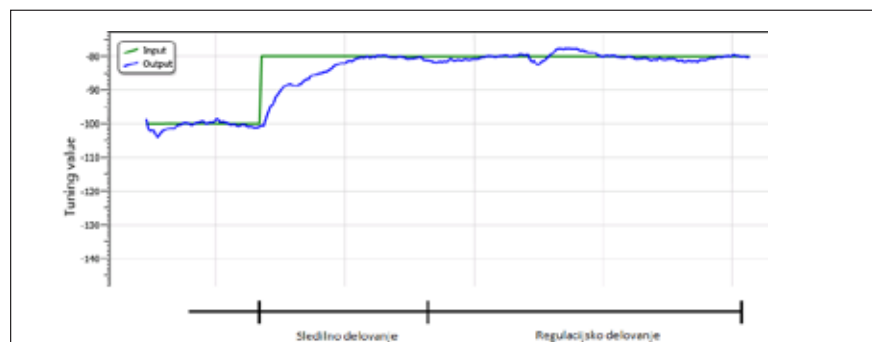
V obravnavanem primeru smo uporabili predvsem regulacijski način delovanja sistema, saj je potrebno zagotavljati konstanten tlak. Za potrebe testiranja regulatorja pa smo preskusili tudi sledilno delovanje.

3.3.2 Obstoječa regulacija s Siemensovim blokom CONT_C

Obstoječi zbirni sistem plinskih emisij je bil zgrajen in poslan v obratovanje leta 2008. Krmilna oprema sistema je iz družine Siemens Simatic S7, PLC-program je bil napisan v okolju Step 7. Za potrebe regulacije tlakov v posameznih vejah je bil

uporabljen Siemensov regulacijski blok CONT_C iz standardne programske knjižnice. Parametri regulatorja so bili nastavljeni ročno na podlagi več zaporednih iteracij. Okno vmesnika SCADA za sistem odsesavanja pri rekuperativni termični obdelavi je prikazano na sliki 7. Primer tipičnih odzivov sistema na spremembo referenčnega tlaka je prikazan na slikah 8 in 9.

Iz odzivov na slikah 8 in 9 lahko opazimo, da obstoječa regulacijska struktura dokaj slabo regulira tlak PDIC-108. Bolj kot samo sledenje



Slika 10. Referenčni tlak (zeleno) in dejanski tlak (modro) pri uporabi modificiranega PID-regulatorja

stopnici je kritično predvsem slabo izkrmiljenje motenj, zaradi katerih je pogrešek občasno precej visok.

3.3.3 Regulacija z modificiranim PID-blokom

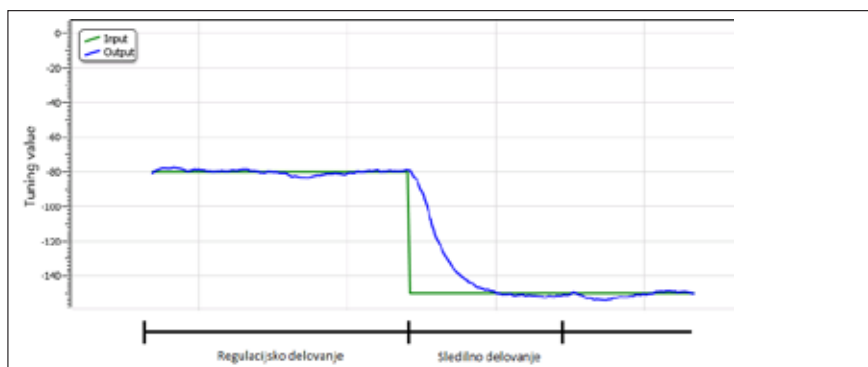
Obstoječi Siemensov regulacijski blok CONT_C smo zamenjali z razvitim FB900 PID-blokom. Regulator smo sprva prekopili v ročni režim in z orodjem PPCT izvedli relejni preskus [3, 4], s čimer smo dobili identificiran proces in predlagane parametre PID-regulatorja. Slednje smo preko vmesnika OPC prenesli na krmilnik in prekopili regulator v avtomatski režim delovanja.

Po relejnem poskusu s PPCT-orodjem smo dobili naslednje parametre PID-regulatorja: $K_p = -0,31$, $T_i = 8,06$ s, $T_d = 2,02$ s in $T_f = 0,36$ s.

Referenčno vrednost smo spreminjali tako navzgor kot tudi navzdol, ker je bil proces nelinearen in je imel različna odziva v obeh smereh. Pri skoku navzgor smo uporabili manjšo spremembo želenega tlaka, da preskusimo obnašanje tudi pri manjših želenih spremembah. Rezultati poskusa na slikah 10 in 11 kažejo, da so pri uporabi novega PID-regulacijskega bloka in uporabi nastavitvenih parametrov, ki smo jih dobili iz programskega paketa PPCT, odzivi zaprtizančnega sistema veliko hitrejši in da je vodenje veliko učinkovitejše kot prej.

4 Zaključek

V članku smo opisali izdelavo in preskušanje regulacijskih blokov modificiranega PID-regulatorja in Smithovega prediktorja, ki smo ju implementirali na Siemensovi plat-



Slika 11. Referenčni tlak (zeleno) in dejanski tlak (modro) pri uporabi modificiranega PID-regulatorja

formi S7. Prednost obeh razvitih blokov je v tem, da nudita dobro zaščito pred integralskim pobegom in udarnim preklopom ter modularno strukturo, ki omogoča enostavno tvorbo kompleksnejših regulacijskih struktur. Dodatna prednost Smithovega prediktorja pa se pokaže pri regulaciji procesov z velikim mrtvim časom, ko postanejo klasični regulatorji PID zelo neučinkoviti.

Rezultati testiranj v industrijskem okolju kažejo učinkovitejše zaprtozančno delovanje v primerjavi s klasičnim Siemensovim blokom. Pri stopničasti spremembi reference je

umiritveni čas krajši, bistvena prednost pa se pokaže predvsem v regulacijskem delovanju, saj regulator uspe precej bolje odpraviti motnje. Razvite regulacijske bloke je mogoče uporabiti na več področjih, kot so: procesna industrija, kemična in farmacevtska industrija, prehrabena industrija, energetika, elektroenergetika itd.

Reference

- [1] K. Åström and T. Hägglund: *PID controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd Edition*, ISA, 1995.
- [2] S. Gerkšič, G. Dolanc, D. Vrančič, J. Kocijan, S. Strmčnik, S. Blažič, I.

Škrjanc, Z. Marinšek, M. Božiček, A. Stathaki, R. B. King, M. B. Hadjiski, K. Boshnakov: A PLC-based system for advanced control. V: S. Strmčnik (ur.), Đ. Juričić (ur.). *Case studies in control: putting theory to work*, (Advances in industrial control, ISSN 1430-9491). London [etc.]: Springer, 2013.

- [3] M. Blazinšek, M. Arh, I. Škrjanc: Vodenje električnega motorja s pomočjo samonastavljivih regulatorjev PID, PFC in mPFC, Ventil, ISSN 1318-7279, feb. 2012, letn. 18, št. 1, str. 42–47.
- [4] M. Blazinšek, M. Arh, I. Škrjanc: Comparison between the auto-tuning of PID, PFC and modified-PFC Controllers, Proceedings of the 7th Vienna Conference on Mathematical Modelling, February 2012.
- [5] D. Vrančič: *Programski modul za sintezo naprednih algoritmov vodenja*, IJS interno poročilo, DP-11214, 2013.
- [6] D. Vrečko, D. Vrančič, Đ. Juričić, S. Strmčnik: A new modified Smith predictor: the concept, design and tuning. ISA trans, 2001 vol. 40, str. 111–121.

Program modules for advanced control algorithms synthesis

Abstract: Control algorithms play an important role in the process industry. Producers of process equipment mostly offer certain sets of control blocks which are mainly variations of PID controllers with some structure limitations. Classic PID controllers tend to fail in controlling processes with long dead-time. However, this can be improved by the Smith predictor. Manual controller tuning usually requires several trials and is therefore time-consuming. This can be improved by using the autotuning of controller parameters. The modified PID controller is upgraded with the identified process model and Smith predictor representing a novelty in the field of process industry for it is almost non-existing on PLC platforms. The key advantage of the Smith predictor is in a more efficient control of processes with long dead-time when compared to classic PID controllers.

Key words: Process control, PID controller, Smith predictor, PPCT autotuning, Simatic S7, OPC, WinCC, PLC

Programski moduli so bili razviti v sodelovanju z Institutom Jožef Stefan (Odsek E2 – Sistemi in vodenje) in Fakulteto za elektrotehniko (Laboratorij za modeliranje, simulacijo in vodenje, Laboratorij za avtonomne mobilne sisteme) v okviru Kompetenčnega centra za sodobne tehnologije vodenja. Kompetenčni center za sodobne tehnologije vodenja delno financirata Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport Republike Slovenije in Evropska unija (EU), in sicer iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.