

Primerjava realnega PI in PFC vodenja avtoklava

Aleksander Preglej¹, Igor Steiner¹, Damir Vrančič², Igor Škrjanc³

¹INEA d.o.o., Ljubljana, Slovenija

²Institut »Jožef Štefan«, Odsek za sisteme in vodenje, Ljubljana, Slovenija

³Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij LAMS, Slovenija

aleksander.preglej@inea.si, igor.steiner@inea.si,
damir.vrancic@ijs.si, igor.skrjanc@fe.uni-lj.si

Comparison of real PI and PFC Autoclave Control

In the contribution we presented and compared real autoclave process with classical proportional-integral (PI) and advanced predictive functional (PFC) approach. All presented data are from the real device. For both approaches we showed the real data of closed-loop static characteristics over the whole operating range and control performance by the temperature profile which is used by the final products production. Autoclave control with both approaches is implemented in the IDR Blok environment. PFC controller was tuned using proposed rules and real-time testing, and so we achieved satisfactory performance of the PFC approach, but we wanted to compare it to the PI approach performance. PI controller was tuned using MOMI method for integral processes, where the set point is additionally filtered with the time constant which is equal to the T_i parameter of the PI controller. At the end we presented the quantitative difference of the both approaches control performance with the given relative estimation value of the integral square error (ISE) and integral absolute error (IAE). We compared also the quantity of the consumed electrical energy by the temperature profile control. Based on the quantitative differences we provided the estimated savings in euros by the PFC approach.

Kratek pregled prispevka

V prispevku je predstavljeno in primerjano vodenje realnega procesa avtoklava s klasičnim proporcionalno-integrirnim (PI) in naprednim prediktivnim funkcijskim (PFC) pristopom. Vsi prikazani podatki so posneti z realne naprave, in sicer smo za oba pristopa podali realne podatke zaprtostančne statične karakteristike čez celotno področje delovanja in učinkovitosti vodenja pri temperaturnem profilu, kakršnega v tovarni uporabljajo pri izdelavi končnih izdelkov. Vodenje avtoklava z obema pristopoma je implementirano v okolju IDR Blok. PFC regulator smo načrtali s pomočjo predlaganih pravil in realnega testiranja ter tako dosegli zadovoljivo učinkovitost, vendar smo jo hoteli primerjati z učinkovitostjo PI pristopa. Zato smo po metodi MOMI za integrirne procese načrtali PI regulator, kjer se dodatno filtrira želena referenca s časovno konstanto filtra enako T_i parametru PI regulatorja. Na koncu smo podali kvantitativno razliko učinkovitosti vodenja obeh pristopov s podano relativno vrednostjo cenilke integrala kvadratov pogreškov (ISE) in integrala absolutnih vrednosti pogreškov (IAE), primerjali pa smo tudi količino porabljene električne energije pri vodenju temperaturnega profila. Na podlagi kvantitativnih razlik smo v evrih podali ocenjen prihranek pri uporabi PFC pristopa.

1 Uvod

V prispevku smo predstavili in primerjali vodenje realnega procesa avtoklava s klasičnim proporcionalno-integrirnim (PI) in naprednim prediktivnim funkcijskim (PFC) pristopom. Vsi prikazani podatki so posneti z realne naprave, in sicer smo za oba pristopa podali realne podatke zaprtozančne statične karakteristike čez celotno področje delovanja in učinkovitosti vodenja pri temperaturnem profilu, kakršnega v tovarni uporabljajo pri izdelavi končnih izdelkov in zagotavlja najboljšo kakovost le-teh. V prispevku smo se ukvarjali predvsem z vodenjem in primerjavo segrevanja in vzdrževanja določene temperature, medtem ko je vodenje hlajenja že od začetka zadovoljivo izvedeno s PFC pristopom.

O samem matematičnem modelu avtoklava je veliko napisano v [1], lineariziran univariabilni in multivariabilni model ter univariabilno in multivariabilno prediktivno vodenje avtoklava je prikazano v [2] in [3], v [4] pa je predstavljeno razvojno okolje IDR Blok, v katerem je tudi izvedeno realno vodenje avtoklava z obema pristopoma. Vsi poskusi uglasitve parametrov regulatorjev in preizkušanje učinkovitosti vodenja so bili izvedeni s praznim avtoklavom, kar pomeni, da vanj ni bil postavljen noben material in tako je bil model procesa vedno enak. Seveda se pri realnem temperaturnem ciklu v avtoklav postavlja različne mase različnih materialov, zato se model procesa od cikla do cikla spreminja.

Prispevek je sestavljen v naslednjem vrstnem redu: v poglavju 2 je predstavljeno vodenje z uporabo PFC pristopa, v poglavju 3 je predstavljeno vodenje s PI pristopom po MOMI metodi za integrirne procese, v poglavju 4 je primerjana učinkovitost obeh uporabljenih pristopov in v poglavju 5 je povzet zaključek.

2 Prediktivno funkcijsko vodenje

Prediktivni PFC regulator smo uglasili s pomočjo pravil opisanih v [5] in [6]. Za

uglasitev parametrov PFC regulatorja najprej potrebujemo model procesa v obliki prenosne funkcije prvega reda, zaradi česa smo najprej zgradili matematični model [1].

2.1 Uglasitev parametrov regulatorja

Dobljen model smo nato linearizirali v določeni delovni točki [2], od koder lahko razberemo model s parametri

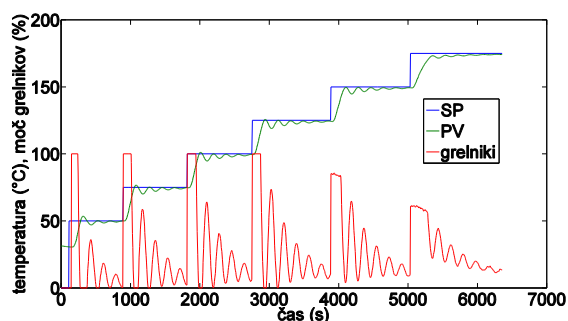
$$\begin{aligned}K_m &= 48,5 \\T_m &= 63034. \\D_m &= 30\end{aligned}\quad (1)$$

Nadalje pa smo upoštevali pravila za nastavljanje parametrov regulatorja podana v [2], kjer so napisana nekoliko pohitrena pravila iz [6]. Po nekaj poizkusih uglasitve parametrov regulatorja na realni napravi, kjer smo postopoma spreminjali tako parametre modela kot tudi parametra T_r in H , smo dobili sledeče uporabne parametre PFC regulatorja za segrevanje

$$\begin{aligned}K_m &= 55 \\T_m &= 59500 \\D_m &= 30 \\T_r &= 40 \\H &= 20\end{aligned}\quad (2)$$

2.2 Zaprtozančna statična karakteristika

Z omenjenimi parametri regulatorja smo dobili zaprtozančno statično karakteristiko s PFC regulatorjem čez celotno delovno območje prikazano na sliki 1 (modra – zelena vrednost, zelena – izhod procesa, rdeča – izhod regulatorja), kjer lahko vidimo sprejemljivo, a nekoliko oscilatorno vodenjem z minimalnim prevzponom in brez pogreška v ustaljenem stanju, hitrim dvižnim in nekoliko daljšim umiritvenim časom ter relativno nemirnim signalom aktuatorja.

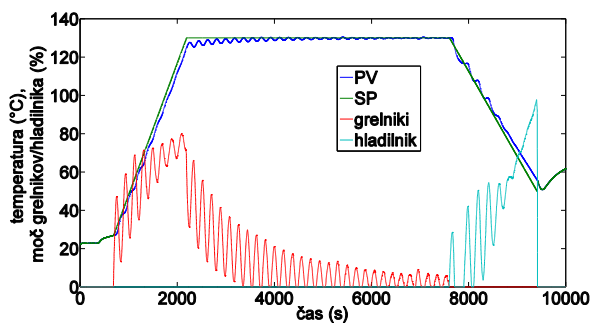


Sl. 1: Zaprtzoančna statična karakteristika s PFC regulatorjem

Taka uglasitev PFC regulatorja je dala zadovoljive rezultate (vendar ne moremo reči dobrih) pri vodenju praznega avtoklava, zato smo jih preizkusili tudi med realnim delovanjem z vloženo neznanom maso materiala, ki se od cikla do cikla spreminja.

2.3 Vodenje temperaturnega profila

Rezultati uporabe PFC pristopa pri vodenju temperaturnega profila z neznanom maso vstavljenega materiala so prikazani na sliki 2 (modra – izhod procesa, zelena – zelena vrednost, rdeča/cyan – izhod regulatorja), kjer vidimo precej dobro sledenje referenci z minimalnimi odstopanji tudi pri prvem prelomu rampe v konstanto. Signal aktuatorja je sicer dokaj oscilatoren, vendar je v mejah normalnega obratovanja, tudi maksimalne vrednosti nikoli ne doseže, saj ni potrebe.



Sl. 2: Vodenje temperaturnega profila s PFC regulatorjem

Glede na potencialno neuporabnost odziva na stopnico z istim PFC regulatorjem, je vodenje temperaturnega profila zelo učinkovito in se kot tako tudi redno uporablja na realnem procesu v tovarni. Prednost je tudi precejšnja robustnost pristopa, saj se ob spremembah mase materiala

v avtoklavu oziroma spremembah modela procesa odzivi vodenja ne spreminjajo bistveno.

Odzivi so malenkost oscilatorni, ker je PFC regulator hitro uglasen, pa še to na model praznega avtoklava. Da bi dobili odzive brez nihanj in s hitrejšim iznihanjem za splošen proces (za kakršnokoli maso položeno v avtoklav) v takšni enostavni univariabilni linearni izvedbi ni možno, saj v naprej mase ne poznamo, s tem pa ne poznamo modela procesa. Za še boljše odzive bi lahko uporabili kakšen adaptivni prediktivni pristop, ki bi sproti popravljal parametre PFC regulatorja glede na spremembo procesa. Po drugi strani pa bi lahko od tehnologov v tovarni dobili podatke o najbolj pogostih masah izdelkov, ki jih vstavljajo v avtoklav, in potem bi lahko PFC uglasili na neko povprečno najbolj pogosto maso, se pravi na najbolj pogost model procesa in bi zagotovo dobili še boljše rezultate.

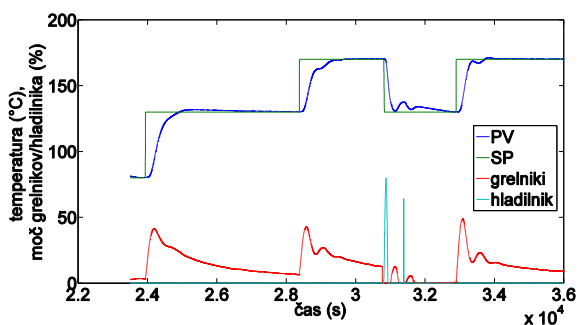
3 Proporcionalno-integrirno vodenje po MOMI metodi za integrirne procese

Rezultate dobljene s PFC pristopom smo primerjali z rezultati dobljenimi s klasičnim PI pristopom, ki smo ga uglasili po metodi magnitudnega optimuma z večkratno integracijo (angl. Magnitude Optimum Multiple Integration – MOMI) za integrirne procese [7], kjer se dodatno filtrira referenca s časovno konstanto filtra enako T_i parametru PI regulatorja.

3.1 Uglasitev parametrov regulatorja

Po nekaj poizkusih uglasitve parametrov regulatorja prikazanih na sliki 3 (modra – izhod procesa, zelena – zelena vrednost, rdeča, cyan – izhod regulatorja), kjer smo postopoma pohitrili regulacijsko zanko, smo dobili sledeče uporabne parametre

$$\begin{aligned} K_p &= 2,25 \\ T_i &= 224 \\ Flt_{SP} &= 224 \end{aligned} \quad (3)$$



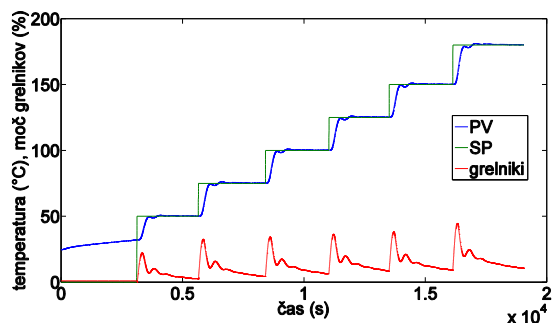
Sl. 3: Uglasitev parametrov PI regulatorja

Omenjeni parametri PI regulatorja so uporabljeni pri tretji stopnici navzgor, kjer je uglasitev regulatorja tudi najhitrejša. Pri prvi stopnici je uglasitev najpočasnejša, pri drugi pa nekoliko hitrejša od prve, vendar počasnejša od tretje.

3.2 Zaprtzančna statična karakteristika

Z omenjenimi parametri regulatorja smo dobili zaprtzančno statično karakteristiko s PI regulatorjem čez celotno delovno območje prikazano na sliki 4 (modra – izhod procesa, zelena – želena vrednost, rdeča – izhod regulatorja), kjer vidimo zelo učinkovito vodenje z minimalnim prevzponom in brez pogreška v ustaljenem stanju, hitrim dviznim in umiritvenim časom ter relativno mirnim signalom aktuatorja brez oscilacij.

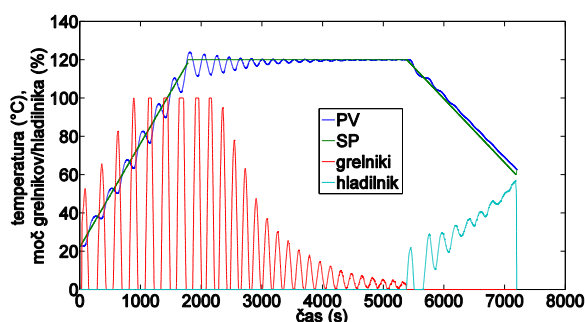
Taka uglasitev PI regulatorja je dala zelo dobre rezultate pri vodenju praznega avtoklava, zato smo jih preizkusili tudi med realnim delovanjem.



Sl. 4: Zaprtzančna statična karakteristika s PI regulatorjem

3.3 Vodenje temperaturnega profila

Rezultati uporabe PI pristopa pri vodenju temperaturnega profila z neznano maso vstavljenega materiala so prikazani na sliki 5 (modra – izhod procesa, zelena – želena vrednost, rdeča, cyan – izhod regulatorja), kjer vidimo precej slabše sledenje referenci s ponekod kar velikimi odstopanji. Signal aktuatorja je občutno preveč oscilatoren, v bistvu gre v enem delu skoraj za dvostopenjsko vodenje, kjer aktuator preklaplja med minimalno in maksimalno vrednostjo.



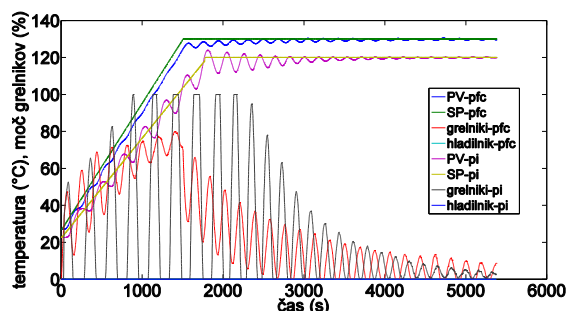
Sl. 5: Vodenje temperaturnega profila s PI regulatorjem

Glede na precejšnjo uporabnost odziva na stopnico z istim PI regulatorjem, je vodenje temperaturnega profila precej slabše in je kot tako neuporabno za realno uporabo. Slabost pristopa je precejšnja nerobustnost, saj se ob spremembah mase materiala v avtoklavu oziroma spremembah modela procesa odzivi vodenja bistveno spreminjajo.

4 Primerjava obeh pristopov vodenja

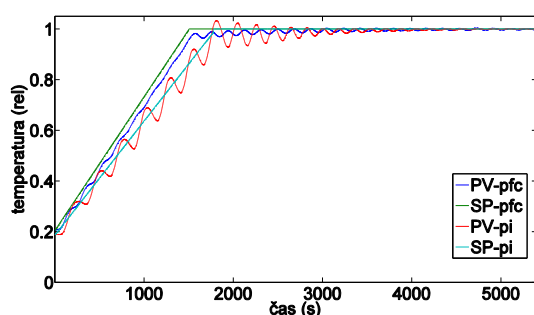
Primerjava vodenja temperaturnega profila z obema pristopoma je prikazana na sliki 6 (modra – izhod procesa pri PFC, zelena – želena vrednost pri PFC, rdeča, cyan – izhod regulatorja PFC, vijolična – izhod procesa pri PI, rumena – želena vrednost pri PI, črna, modra – izhod regulatorja PI). Za primerjavo smo vzeli le del temperaturnega profila do začetka hlajenja, se pravi segrevanje in vzdrževanje temperature ter enako trajanje pri obeh pristopih. Kljub temu, da profila pri PFC in PI pristopu nista popolnoma enaka (pri PFC pristopu je višja želena vrednost, tudi hitrejši vzpon in daljše vzdrževanje temperature), so

lepo vidne močnejše oscilacije pri izhodu procesa in regulatorja pri PI pristopu.



Sl. 6: Primerjava vodenja temperaturnega profila s PFC in PI pristopom

Tako smo za izračun integralnih cenilk odzive normalizirali in jih prikazali na sliki 7 (modra – izhod procesa pri PFC, zelena – zelena vrednost pri PFC, rdeča – izhod procesa pri PI, cyan – zelena vrednost pri PI).



Sl. 7: Primerjava normaliziranih odzivov vodenja temperaturnega profila s PFC in PI pristopom

V nadaljevanju smo podali kvantitativno razliko učinkovitosti vodenja obeh pristopov z relativno vrednostjo cenilke integrala kvadratov pogreškov (ISE) in integrala absolutnih vrednosti pogreškov (IAE), primerjali pa smo tudi količino porabljene električne energije pri vodenju temperaturnega profila.

4.1 Cenilka ISE

Za odziva obeh pristopov smo izračunali relativno vrednost ISE integralske cenilke in pri PFC pristopu dobili 2,18, pri PI pristopu pa 3,6, kar pomeni, da je relativna vrednost cenilke pri PFC pristopu za 1,42 manjša, to pa je izraženo v odstotkih enako 65 %.

4.2 Cenilka IAE

Če za oba pristopa izračunamo še relativno vrednost IAE integralske cenilke, dobimo pri

PFC pristopu 77,6, pri PI pristopu pa 92,5. To pa pomeni, da je relativna vrednost cenilke pri PFC pristopu za 14,9 manjša, v odstotkih je to dobrih 19 %.

Če pa pogledamo absolutne vrednosti IAE integralske cenilke, pa pri PFC pristopu dobimo $1,0087 \cdot 10^4$ °C, pri PI pristopu pa $1,11 \cdot 10^4$ °C, kar pomeni, da je razlika 1010 °C v prid PFC pristopa.

Razliko absolutne vrednosti IAE cenilke lahko fiktivno izrazimo tudi v denarju. Če odstopanje od zelene temperature za 1 °C poslabša kvaliteto izdelka v vrednosti 0,01 € in vzamemo bolj učinkovit PFC pristop kot ničto stanje, potem bi pri vsakem izdelku podjetje z uporabo PI pristopa izgubilo 10 €. Če temperaturni cikel traja 2,5 uri in v enem ciklu hkrati naredijo 4 izdelke, to pomeni ob 8 urnem delavniku 12 izdelkov na dan, kar pa je ob povprečno 21. delovnih dneh v mesecu 252 izdelkov na mesec ali 3024 izdelkov na leto. To izraženo v denarju bi letno zneslo dobrih 30.000 € izgube ob uporabi PI pristopa.

4.3 Porabljena električna energija

Če pogledamo še vrednosti izhoda regulatorja pri obeh pristopih v kW (na prejšnjih slikah so prikazane v odstotkih), je poraba energije pri PI pristopu na prvi pogled višja od porabe energije pri PFC pristopu, vendar izračun pokaže nasprotno in je porabljena energija pri PFC pristopu 42,75 kWh, pri PI pristopu pa 36,44 kWh. Tako je razlika le 6,313 kWh, kar pri ceni približno 0,07 €/kWh pomeni nekje 0,5 € na 4 izdelke v prid PI pristopa.

Po drugi strani pa signal aktuatorja pri PI pristopu kar nekaj časa skače iz minimalne na maksimalno vrednost, kar na dolgi rok zagotovo slabo vpliva na delovanje samega aktuatorja, hkrati pa visoki vrhovi porabe negativno vplivajo na električno omrežje in lahko pomenijo dodatne stroške za podjetje.

Če sedaj upoštevamo še nižjo porabo v primeru PI pristopa, bi podjetje z uporabo PI pristopa pri vsakem izdelku izgubilo 9,875 €, to

pa bi na letni ravni zneslo slabih 30.000 € izgube.

5 Zaključek

V prispevku smo primerjali vodenje avtoklava s klasičnim PI in prediktivnim PFC pristopom. Podali smo parametre lineariziranega modela v obliki prenosne funkcije prvega reda in vrednosti parametrov obeh regulatorjev, nato izrisali statično karakteristiko čez celotno delovno področje in vodenje temperaturnega profila z obema pristopoma ter ju na koncu kvantitativno primerjali.

PI pristop je sicer pri statični karakteristiki bolj učinkovit, ker je bolje uglasen za konkreten model praznega avtoklava kot predstavljen hitro uglasen PFC pristop, pri katerem so odzivi pri statični karakteristiki nekoliko oscilatorni in se počasi iznihajo. Vendar se model procesa pri realni uporabi stalno spreminja, ker v avtoklav polagajo različno maso materiala, zato tudi ni toliko pomembno, da PFC regulator ni bolje uglasen za vodenje praznega avtoklava.

PFC pristop pokaže svoje prednosti z zelo dobrim sledenjem reference (majhnimi odstopanji od zelene vrednosti) in precejšnjo robustnostjo (brez večjih oscilacij) pri spreminjanju modela procesa, za razliko od PI pristopa, kjer so odstopanja od zelene vrednosti in oscilacije občutno večje. Če bi hoteli oscilacije pri PFC pristopu še zmanjšati in še izboljšati sledenje referenci, bi morali PFC regulator uglasiti na neko najbolj pogosto maso vstavljenega materiala ali pa uporabiti adaptivni prediktivni pristop vodenja, kjer bi se parametri PFC regulatorja sproti samodejno popravljali glede na spremembo procesa

Kvantitativna primerjava pokaže, da je vrednost ISE cenilke pri PI pristopu za cca. 40 % višja od vrednosti pri PFC pristopu. Vrednost IAE cenilke pri PI pristopu pa je za cca. 10 % višja kot pri PFC pristopu, kar lahko predstavimo tudi kot zmanjšanje kvalitete izdelkov in s tem izgube. Sicer je poraba električne energije pri PFC pristopu nekoliko višja (6 kWh na temperaturni cikel), vendar je signal aktuatorja pri PI pristopu precej bolj

oscilatoren, kar slabo vpliva na sam aktuator (hitrejše staranje), hkrati pa visoke špice porabe negativno vplivajo na električno omrežje. Tako bi izguba v primeru uporabe PI pristopa na letni ravni znašala slabih 30.000 €.

6 Zahvala

Operacijo doktorskega študija mladega raziskovalca delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007 – 2013, 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti, prednostne usmeritve 1.1.: Strokovnjaki in raziskovalci za konkurenčnost podjetij.

Zahvaljujemo se tudi Kompetenčnemu centru za sodobne tehnologije vodenja (KC STV), ki ga delno financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo ter Evropska unija (EU), in sicer iz Evropskega sklada za regionalni razvoj, da je omogočil financiranje dela na algoritmih.

7 Literatura

- [1] Preglej, A., Karba, R., Steiner, I., Škrjanc, I. *Mathematical Model of an Autoclave*. Journal of Mechanical Engineering, vol. 57, no. 6, p. 503-516, 2011.
- [2] Preglej, A., Steiner, I., Blažič, S. *Multivariable Predictive Functional Control of an Autoclave*. Journal of Mechanical Engineering, vol. 59, no. 2, p. 89-96, 2013.
- [3] Preglej, A., Steiner, I., Škrjanc, I. *Primerjava izvedenega univariabilnega in simuliranega multivariabilnega vodenja avtoklava*. AIG'11, 31. marec in 1. april 2011, Maribor, Slovenija, p. 55 (short overview).
- [4] Preglej, A., Šink, A., Vrančič, D., Steiner, I. *Razvojno okolje IDR Blok*. ERK'2012, 17.-19. september 2012, Portorož, Slovenija, p. 181-184.
- [5] Dovžan, D., Škrjanc, I. *Control of mineral wool thickness using predictive functional control*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 28, no. 3, p. 344-350, 2012.
- [6] Dovžan, D., Škrjanc, I. *Self-tuning algorithms for predictive functional controller*. Electrotechnical Review, vol. 74, no. 4, p. 205-210, 2009.
- [7] Vrančič, D., Huba, M., Oliveira, P. M., Strmčnik, S. *MOMI tuning method for integral processess*. Control 2008, 21.-23. julij 2008, Vila Real, Portugalska, p. 595-600, 2008.