

# Napredni PID programski modul

Matic Golob<sup>1</sup>, David Jure Jovan<sup>2</sup>, Damir Vrančič<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kolektor Sisteh, d.o.o., Šlandrova ulica 10, Ljubljana – Črnuče

<sup>2</sup>Akripol, d.o.o. Prijateljeva cesta 11, Trebnje

<sup>3</sup>Institut »Jožef Stefan« Jamova cesta 39, Ljubljana

matic.golob@kolektor.com, david.jovan@akripol.si, damir.vrancic@ijs.si

## *Advanced PID program module*

The effectiveness of control algorithms has an important role in industrial process control. Manufacturers of PLC and control equipment offer a range of process control blocks often consisting of various versions of PID controllers. They have certain limitations, which are reflected in a non-optimal control of processes. These restrictions are usually related to inferior anti windup protection, a non-optimal switching between manual and automatic control, limited filtering of output signals and lack of functionality.

Due to mentioned shortcomings, we have developed PID software module, which always provides the realizable setpoint to the PID algorithm, additional zero-zone and selection between the actual setpoint, the ramp generated setpoint and the square function setpoint.

Output of PID algorithm is filtered by two first-order low-band filters, for the purposes of limiting actuator signals. It is also possible to activate the amplitude and the speed limit, as well as the dead zone. In order to obtain robust response, an anti-windup protection is included and feedforward input is added.

The new program block is suitable for controlling of actuators with analog signals, as well as the three-point actuators with and without feedback signal and pulse width modulation. Optionally due to optimized anti-windup protection, you can connect two or more controllers connected in a cascade structure.

Developed control module has been tested in the company Akripol, d.o.o. in control of temperature loops in the process of making acrylic plates.

## *Kratek pregled prispevka*

Učinkovitost regulacijskih algoritmov igra pomembno vlogo pri vodenju procesov v industriji. Proizvajalci krmilne in regulacijske opreme praviloma ponujajo nabor regulacijskih blokov, pri čemer prevladujejo različne izvedbe PID regulatorjev. Le-ti pa imajo določene omejitve, ki se odražajo v neoptimalnem vodenju procesov. Omenjene omejitve so najpogosteje neprimerna zaščita pred integralskim pobegom, neoptimalen preklon ročno-avtomatsko, omejeno filtriranje izhodnih signalov in pomanjkanje nekaterih funkcionalnosti. Za regulacijo zahtevnih, tehnološko specifičnih procesov z omejitvami na aktuatorjih in senzorjih pogosto potrebujemo PID algoritem, ki je enkapsuliran v celovit in naprednejši programski modul.

Zaradi naštetih pomanjkljivosti smo razvili PID programski modul, ki v vsakem trenutku zagotavlja izračun izvedljive reference na vhodu v PID algoritem, ničelno cono ter možnost izbire med dejansko referenco, referenco po rampi in referenco po kvadratni funkciji.

Izhod PID algoritma je filtriran z dvema nizko-pasovnima filtroma prvega reda, za potrebe omejitev signalov na aktuatorjih pa je možno aktivirati amplitudno in hitrostno omejitev, kot tudi mrtvo cono. Pogoji za robustno delovanje zagotavlja zaščita pred integralskim pobegom, v primeru dobro definirane in znanega procesa pa lahko uporabimo vhod za vnaprejšnje vodenje.

Programski blok je primeren tako za regulacijo aktuatorjev z zveznim signalom, kot tudi za regulacijo 3-točkovnih aktuatorjev z in brez povratnega položaja in pulzno-širinsko modulacijo. Zaradi optimizirane zaščite pred integralskim pobegom se lahko dva ali več regulatorjev poveže v kaskadno strukturo.

Razvit regulacijski modul je bil preizkušen v podjetju Akripol, d.o.o. pri vodenju temperaturnih zank v procesu izdelave akrilnih plošč.

## 1 Uvod

Regulacijski algoritmi igrajo v procesni industriji pomembno vlogo [1, 2]. Proizvajalci procesne opreme praviloma ponujajo programirljive logične krmilnike (PLC) z vgrajenimi regulacijskimi bloki. Največkrat gre za različne izvedbe regulatorjev tipa PID (proporcionalno – integrirno – diferencirni regulatorji), ki pa imajo določene omejitve. Prispevek opisuje napredni PID regulacijski blok, ki predstavlja pomembno funkcionalno razširitev glede na klasične regulacijske bloke, ki jih zasledimo v industrijski regulacijski opremi.

Povod za razvoj programskega modula je bilo predvsem pomanjkanje naprednih funkcij: upoštevanje amplitudnih, hitrostnih in nelinearnih omejitev aktuatorjev pri izračunu izvedljivih regulirnih signalov, napredna zaščita pred integralskim pobegom, optimiziran preklop ročno-avtomatsko, vhodni in izhodni filtri ter generatorji referenčnih in izhodnih signalov, enostavno sestavljanje blokov v kaskadne strukture in še bi lahko naštevali. V industriji so namreč težnje po robustnem, ponovljivem vodenju, kot tudi zmanjšanju proizvodnih stroškov iz dneva v dan večje, kar je možno doseči le z optimalnim regulacijskim algoritmom.

## 2 Ciljno okolje regulatorja

Razvit regulacijski modul je bil preizkušen v podjetju Akripol, d.o.o. pri vodenju temperaturnih zank v procesu izdelave akrilnih plošč.

Akripol d.o.o. je vodilno slovensko podjetje za proizvodnjo in predelavo polimerov, ki na proizvodnji liniji Aglas izdeluje lite akrilne plošče, namenjene protihrupni zaščiti na avtocestah, gradbeništvu in sanitarnemu pohištvu. Eden ključnih korakov izdelave akrilnih plošč je postpolimerizacija, to je postopek, s katerim zagotovimo dokončno pretvorbo monomera v polimer in ustrezne

fizikalne lastnosti akrilnih plošč. Postpolimerizacija je eksotermna reakcija, ki poteka nad steklasto temperaturo akrila, kjer dokončno reagirajo ostanki monomera v vhodni surovini. Proces postpolimerizacije poteka v toplozračnih komorah.

Akrilne plošče, končni izdelek procesa postpolimerizacije, se izdelujejo v namenskih kalupih, sestavljenih iz dveh vzporednih kaljenih stekel. Med stekli se vstavi gumijasta tesnilna vrstica, nato se kalup učvrsti s sponami za zagotovitev njegove tesnosti. Pripravljeni kalupi se vstavijo v regal, ki se s transportnim vozičkom namesti v postpolimerizacijske komore. Stekleni kalupi so lahko različnih dimenzij. Z izbiro različno debelih tesnilnih vrvic se definira končna debelina akrilne plošče. Postpolimerizacijske komore se ogreva z vročim zrakom, ki ga zagotavljajo stransko vgrajeni plinski gorilniki. Za kroženje ogrevalnega in hladilnega zraka skrbijo ventilatorji.

V postpolimerizacijskih komorah poteka proces segrevanja regala po predpisanem temperaturnem profilu, ki ga sestavlja več faz, t.i. toplotnih ciklov. Postopek postpolimerizacije se začne s segrevanjem kalupov na delovno temperaturo, sledi zadrževalna faza, ki zagotovi enakomerno segrevanje akrilne mase zaradi dovedene toplote in sproščanja toplotne energije iz potekajoče eksotermne reakcije. V naslednji fazi vzdrževanja temperature reagirajo preostanki akrilata v kalupih. Po končani reakciji postpolimerizacije sledi faza ohlajevanja, zelo pomembna predvsem zaradi zahteve po enakomernem ohlajanju, ki v ploščah prepreči nastajanje notranjih napetosti.

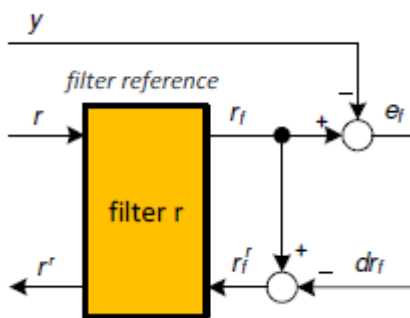
## 3 Razvoj programskega bloka

PID regulator spada med osnovne gradnike vodenja. Sestavljen je iz proporcionalnega (P), integrirnega (I) in diferencirnega (D) člena. V praksi je veliko različnih izvedb tovrstnega algoritma, ki se razlikujejo v strukturi (serijska,

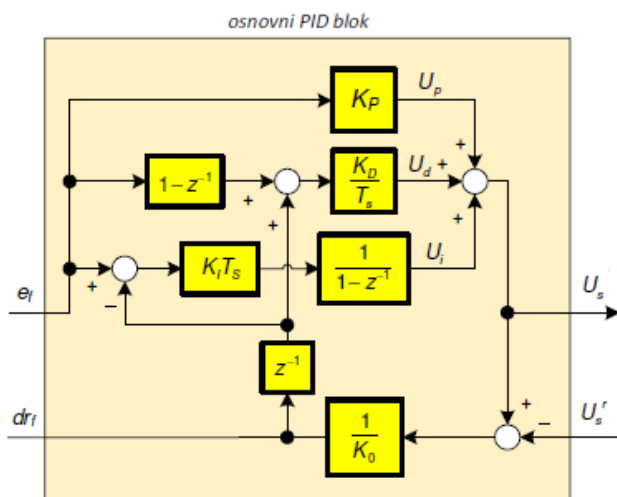
paralelna), izvedbi zaščite pred integralskim pobegom ter filtriranji [3].

### 3.1 Jedro bloka

Iz dosedanjih izkušenj na področju vodenja sistemov smo se odločili izdelati inovativno verzijo PID algoritma, ki ima vgrajeno takšno zaščito pred integralskim pobegom, ki omogoča modularno združevanje več regulatorjev v kaskadne vezave. Bločna shema tovrstnega regulatorja je podana na slikah 1,2,3 in 4 ( $z^{-1}$  pomeni, da je signal zakasnen za en vzorec). Na vhodu se nahaja filter reference (slika 1), za katerim se nato izvaja osnovni PID blok (slika 2).

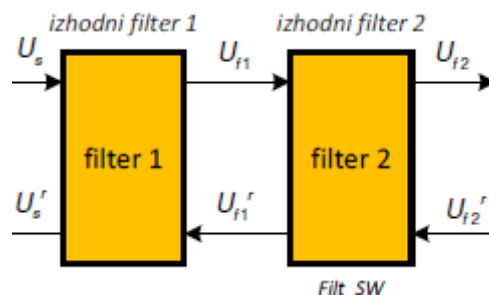


Slika 1: Filter reference.



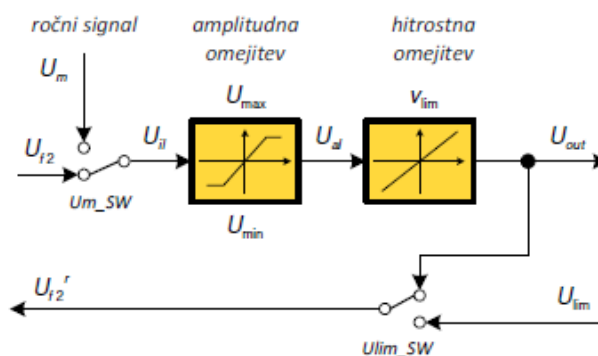
Slika 2: Osnovni PID blok.

Izračunan signal iz PID regulatorja nato filtriramo s filtrom 1. reda (izhodni filter 1), ter po potrebi še s filtrom 2. reda (izhodni filter 2), na sliki 3.



Slika 3: Izhodna filtra.

Sledi izbira med ročnim in avtomatskim vodenjem ter omejitve (amplitudna ter hitrostna), na sliki 4. Signali na spodnji strani ( $U_{lim}$ ,  $U_{f2}^r$ ,  $U_{f1}^r$ ,  $U_s^r$ ,  $d_{r1}$ ,  $r_1^r$ ) služijo izračunu izvedljive reference ( $r^r$ ), ki jo potrebujemo, če želimo uporabiti regulator tudi v kaskadni vezavi oziroma za potrebe diagnostike in zaprtozančne identifikacije [3].

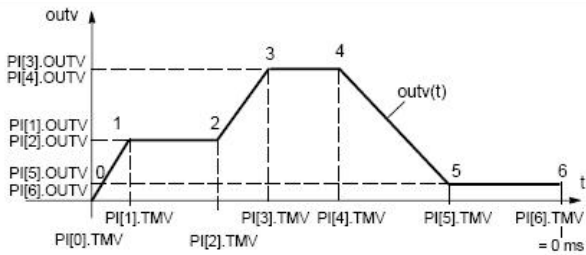


Slika 4: Izhodna stopnja regulatorja.

### 3.2 Dodatne funkcionalnosti bloka

Dodatne funkcionalnosti programskega modula so bile vgrajene naknadno, v drugi razvojni fazi, skladno z zahtevami za vodenje procesa pri končnem uporabniku.

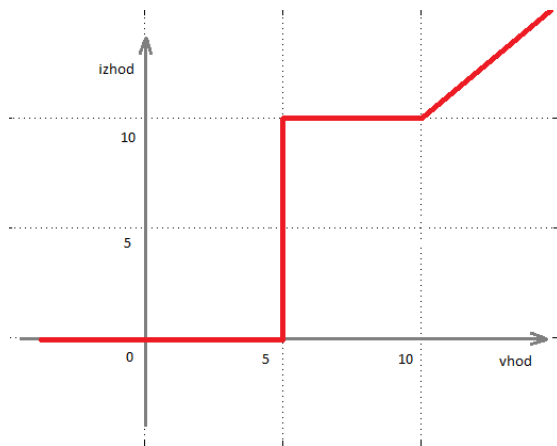
Generator reference spremeni vhodni stopničasti signal reference v linearno naraščajoči signal (rampa) – glej sliko 5 [4], ali pa signal, ki se spreminja po kvadratni funkciji. Prednost generatorja reference je predvsem v pripravi optimalne reference, ki se nato upošteva kot vhod v osnovni PID blok in se manifestira v robustnejšem vodenju z manjšimi prenehaji.



Slika 5: Generator rampe.

Ničelna cona (ang. Zero-zone) vnaša histerezni element v signal pogreška. Le-to uporabimo predvsem takrat, ko imamo opravka s preciznimi in dragimi aktuatorji, ki so občutljivi na stalne spremembe regulirnega signala.

Mrtva cona (ang. Deadband) vnaša histerezo na izhod regulatorja. Element opisuje nelinearno (histerežno) delovanje aktuatorja v spodnjem področju delovanja, npr. v našem primeru pri zvezno vodenih plinskih gorilnikih, ki so do 10% vhodnega signala ugasnjeni. Karakteristiko člena prikazuje slika 6 [5].



Slika 6: Karakteristika deadband člena.

Vhod za vnaprejšnje vodenje (ang. Feedforward), je v pomoč zaprti zanki, ko imamo dobro znan proces, za katerega vemo kako se bo vnaprej obnašal, oziroma imamo dobro merljive in ponovljive motnje, ki jih želimo kompenzirati.

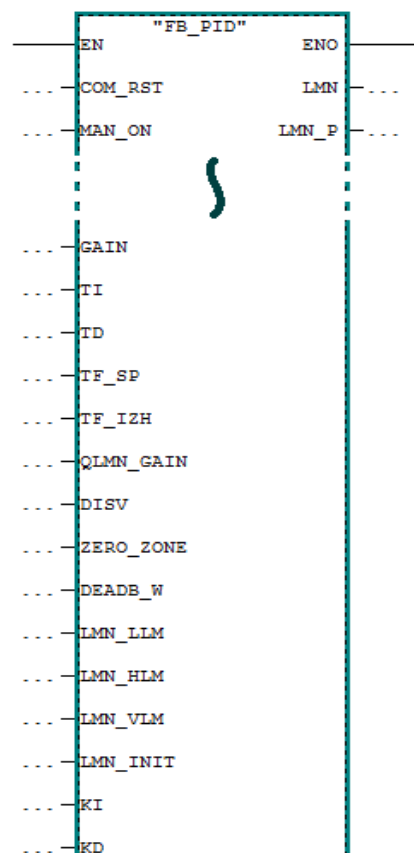
3-točkovni izhod uporabimo namesto klasičnega zveznega izhoda, ko imamo aktuator samo z dvema ali 3 stanji, npr. diskretni on/off ventil, ki ga krmilimo pulzno širinsko, ali pa regulacijski ventil z ločenim diskretnim

krmilnim signalom za odpiranje in zapiranje. Takšni aktuatorji so seveda nekoliko manj učinkoviti od klasičnih zveznih, a ker so cenovno dostopnejši, jih pogosto srečujemo v praksi.

#### 4 Implementacija bloka v PLC okolje

Razvit programski blok je bil implementiran in funkcionalno testiran na PLC platformi Siemens Simatic Manager – Step 7. Programska koda je napisana v strukturiranem jeziku (SCL) in nato prevedena v zbirni jezik, ki se naloži na PLC krmilnik.

Osnovni programski modul je tipa function block, z imenom FB\_PID, vsebuje pa več podrutin oziroma instanc posameznih blokovnih elementov, opisanih v prejšnjem poglavju. Uporabniku programskega bloka, v našem primeru programerju, so vidne in dostopne le spremenljivke, ki so del vhodno-izhodnega vmesnika bloka. Del slednjega je prikazan na sliki 7.

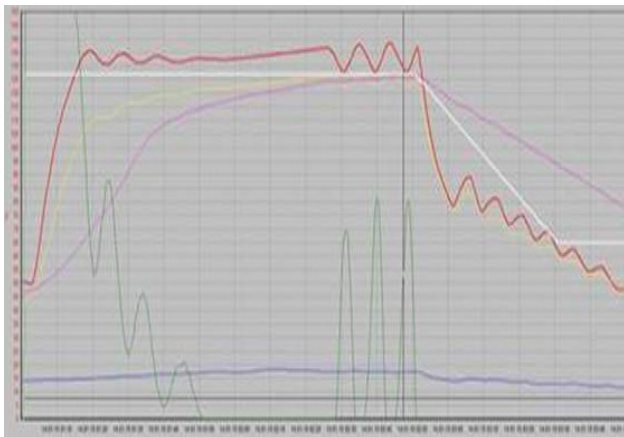


Slika 7: Vmesnik FB\_PID bloka.

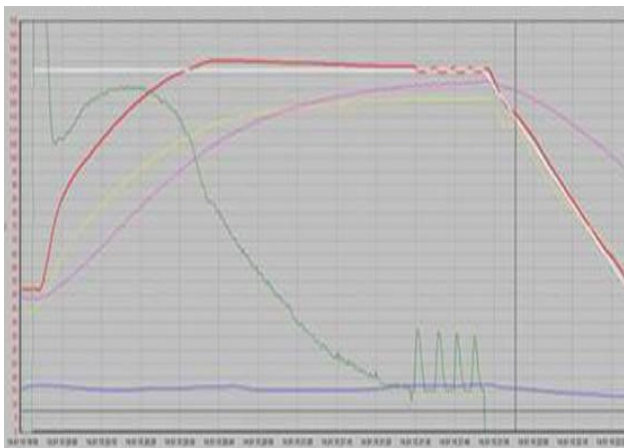
## 5 Rezultati testiranja v industrijskem okolju

Napredni PID programski modul je bil razvit za potrebe vodenja konkretnega zaprtozančnega sistema v industriji.

Na liniji Aglas v podjetju Akripol je bilo opravljeno tako testiranje regulacijskega bloka, kot tudi razhroščevanje in manjše dodelave algoritma. Ker gre za razvojni oziroma t.i. pilotni projekt, pot od idejne zasnove do uspešnih rezultatov ni bila premočrna. Sprva je bila za testiranje na voljo ena postpolimerizacijska komora s pravim kalupom akrilnih plošč. Že ob prvi uspešno zaključeni šarži, so rezultati pokazali, da je regulacija neprimerno boljša od izhodiščnega stanja. Za primerjavo sta na voljo sliki 8 in 9 (bela krivulja je referenca, rdeča je odziv temperature, zelena pa izhod regulatorja - moč gorilnikov).

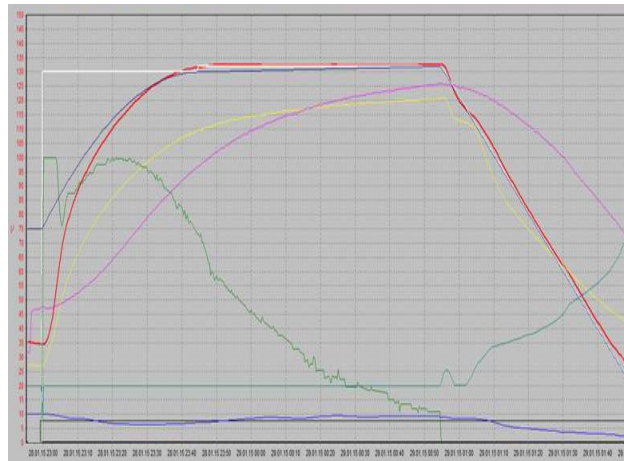


Slika 8: Odziv pred predelavo regulacije.



Slika 9: Odziv po predelavi regulacije.

Z nadaljnjimi iteracijami nam je uspelo regulacijski algoritem, kot tudi parametre, še dodatno optimizirati, kar se je poznalo tako na manjših temperaturnih prevzponih, kot tudi na skupnem času šarže. Slika 10 prikazuje optimiziran odziv.

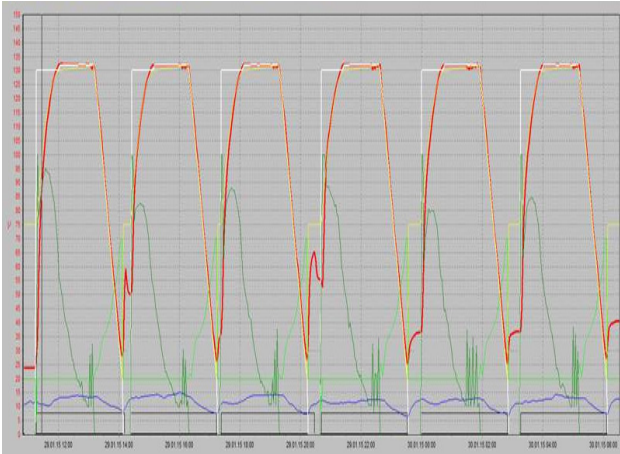


Slika 10: Odziv zaprtozančnega sistema po optimizaciji algoritma in parametrov.

Pomembnejša od oblike odzivov sta v industriji dva faktorja, in sicer proizvodni stroški ter ponovljivost. Prvi je običajno bolj v domeni vodstva podjetja, drugi pa v domeni tehnološkega oddelka.

Ko govorimo o stroških, pri tem mislimo predvsem na strošek energentov, ki se ga da nekoliko zmanjšati z ustreznim temperaturnim profilom zaradi notranje eksotermne reakcije. Med stroški omenimo še strošek vzdrževanja, ki je delno povezan z gladkostjo izhodnega regulirnega signala, in pa seveda neposredni strošek zaradi slabše kakovosti posamezne šarže, kar pa je delno povezano z učinkovitostjo regulatorja. Tekom testiranja so bili kalupi akrilnih plošč kar se da različni a regulator kljub temu nikoli ni imel težav z regulacijo temperature.

Ponovljivost je osnovna zahteva vsakega tehnološkega oddelka v proizvodnji in je v osnovi pomembnejša od ozkih toleranc glede prenihaja, dviznega in umiritvenega časa. Z ustrežno strukturo in parametri regulatorja je možno doseči učinkovito vodenje procesa in s tem skorajda popolno kontrolo nad sistemom in njegovo ponovljivostjo, kar prikazuje slika 11.



*Slika 11: Šest zaporednih šarž.*

Rezultati testiranja razvitega PID programskega modula v industrijskem okolju kažejo učinkovitejšo zaprtostno delovanje v primerjavi s klasičnimi PID programskimi bloki proizvajalcev krmilne opreme. Pri stopničasti spremembi reference je dvizni, kot tudi umiritveni čas krajši, prednost pa se pokaže tudi v regulacijskem delovanju, saj regulator učinkoviteje odpravi motnje.

Razvit napredni programski modul je mogoče uporabiti na več področjih kot so: procesna industrija, kemična in farmacevtska industrija, prehrabena industrija, energetika, elektroenergetika, itd.

## 6 Literatura

- [1] K. Åström and T.Hägglund, PID controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd Edition, ISA, 1995
- [2] S. Gerkišič, 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] D.Vrančič, Programski modul za sintezo naprednih algoritmov vodenja, IJS interno poročilo, DP-11214, 2013.
- [4] Siemens Ag, „Industry Automation Support,“ 23.2.2015. [Elektronski]. Dostopno: <https://support.industry.siemens.com/tf/ww/en/postattachments/imagecontainer/?attachmentId=28987>.
- [5] Wikipedia, „Deadband,“ 23.2.2015. [Elektronski]. Dostopno: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Deadband01.png>.