

Vodenje električnega motorja s pomočjo samonastavljivih regulatorjev PID, PFC in mPFC

Martin BLAZINŠEK, Matija ARH, Igor ŠKRJANC

Izvleček: Tema tega članka je primerjava delovanja treh različnih samonastavljivih regulatorjev na pilotni laboratorijski napravi motor generator. Samonastavljanje je namreč sodoben pristop k nastavljanju regulatorjev, ki omogoča hitrejšo nastavljanje kot ustaljene metode. Samonastavljanje PID-a, PFC-ja in modificiranega PFC-ja je bilo razvito na podlagi relejske metode. Ta metoda vsili ustaljeno nihanje izhoda procesa, kar nam omogoči identifikacijo modela procesa. Nato lahko nastavimo PFC in modificirani PFC-regulator ter izračunamo parametre PID-regulatorja. Rezultati eksperimentov na realni napravi so pokazali, da modificirani PFC-regulator deluje bolje od ostalih dveh.

Ključne besede: samonastavljanje, PID, regulator, modificirani, PFC, relejska, metoda, enosmerni, električni, motor, vodenje

■ 1 Uvod

V sodobnem svetu se na vseh področjih uveljavlja avtomatizacija procesov, saj prinaša številne prednosti. Obratovanje naprav je z njo v veliki meri postalo neodvisno od prisotnosti človeka. Rezultat tega sta povečana proizvodnja in pocenitev končnih produktov.

Eden ključnih delov avtomatizacije so pravilno nastavljeni regulatorji, ki vodijo procese in skrbijo, da se njihove izhodne veličine gibljejo v predpisanih mejah. Čeprav so poracionalno-integracijsko-diferenčni (PID) regulatorji najbolj razširjeni regulatorji v industrijskih procesih, so pogosto slabo nastavljeni. To ima lahko negativen vpliv na proizvo-

dno, kar vodi do izgub pri porabi energije in surovin ter do zamud pri izpolnjevanju nalog.

V literaturi je bilo predlaganih veliko metod za nastavljanje PID-regulatorjev. Večina od njih je bila razvita za ročno nastavljanje, kar pa zahteva veliko časa in izkušene operaterje. Tem oviram pa se lahko izognemo s sodobnimi načini nastavljanja regulatorjev, kot je samonastavljanje (auto-tuning). To je metoda, pri kateri se regulator nastavi samodejno na zahtevo uporabnika. Z vgradnjo takšne metode v regulacijski proces bistveno poenostavimo njegovo uporabo. Takšen pristop dovoljuje operaterjem z manj znanja o teoriji regulacij, da pravilno nastavijo regulatorje. Veliko metod za nastavljanje PID-regulatorjev je mogoče avtomatizirati, vendar nekatere lažje kot druge. Takšne metode so npr. relejska metoda [1], Ziegler-Nicholsovi metodi nihajni preizkus in odziv na stopnico [2], Magnitude-Optimum-Multiple-Integrations (MOMI) [3], metoda Chien-Hrones-Reswick [4] za pro-

porcionalne sisteme višjega reda, nato standardne optimizacijske metode, kot so integralske cenilke [5] ter metahevrstične evolucijske metode, kot so genetski algoritmi za nastavljanje PID-parametrov [6] itd.

Prediktivno-funkcijski regulator (PFC) pa uporablja parametrični model procesa in še dva dodatna parametra, ki sledita iz izpeljave [7]. Ta dva parametra sta izbrana tako, da dobimo primeren odziv sistema. V tem članku je uporabljen tudi modificirani PFC (mPFC), ki uporablja dodatno povratno zanko z ojačenjem. Ojačenje lahko določimo z analizo prenosne funkcije.

Prednost avtomatskega nastavljanja PFC je v direktni uporabi parametričnega modela, medtem ko nekatere metode za nastavljanje PID uporabljajo rezultate zelo specifičnih testov. To pomeni, da bi za nastavitve PID za znan parametrični model procesa še vedno morali izvesti te teste. Po drugi strani pa identifikacija procesa lahko vzame veliko časa

Martin Blazinšek, univ. dipl. inž., Matija Arh, univ. dipl. inž., prof. dr. Igor Škrjanc, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

in so lahko postopki za nastavitve PID-regulatorjev hitrejši.

■ 2 Relejska metoda

2.1 Kaj je relejska metoda?

Relejska metoda spada med zaprtostančne metode nastavljanja PID-regulatorjev. Temelji na frekvenčnem odzivu sistema in je zelo učinkovita pri določanju kritičnega ojačenja K_u in kritične frekvence ω_u sistema. Njena prednost pred ostalimi metodami je v tem, da identificira proces v okolici pomembne frekvence (kritične frekvence) sistema. Kot zaprtostančna metoda omogoča, da proces identificiramo v želeni delovni točki in v realnem času. Pri sistemih z daljšimi časovnimi konstantami je hitrejša kot konvencionalno preizkušanje s stopnico ali pulzom [8].

Sistem za samonastavljanje PID-regulatorja deluje v dveh fazah. V prvi fazi algoritem določi K_u in ω_u , izračuna PID-parametre in identificira proces. Nato preklopi v drugo fazo delovanja, kjer uporabi prej izračunane PID-parametre in izvede eksperiment. Pri poskusu opazujemo delovanje regulatorja pri sledenju referenci in odzivu na motnjo.

Opis prve faze je razdeljen na naslednji dve podpoglavji: Relejski odziv in Identifikacija.

2.2 Relejski odziv

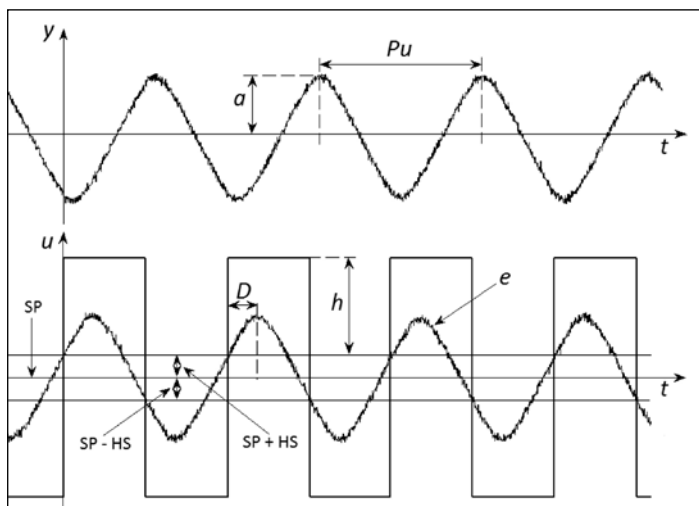
Z relejskim odzivom določimo K_u in ω_u po naslednjih korakih. Najprej pripeljemo sistem v ustaljeno stanje. Nato z relejem vsilimo majhno (npr. 5 %) spremembo na vходу sistema u . Takoj, ko pogrešek e prestopi določeno mejo (SP) plus histerezo ($\pm HS$), z relejem vsilimo nasprotno (npr. -5 %) spremembo na vходу. Preklapljanje se ponavlja, dokler izhod sistema y ne zaniha ustaljeno (slika 1). Takrat preberemo kritično periodo nihanja P_u in izračunamo ω_u z enačbo (1). K_u izračunamo po enačbi (2), kjer h predstavlja amplitudo releja, a pa amplitudo izhodnih oscilacij sistema. Enačba (3) predstavlja model realnega PID-regulatorja, ki ga sestavljajo proporcionalno oja-

$$\omega_u = \frac{2\pi}{P_u} \quad (1)$$

$$K_u = \frac{4h}{\pi a} \quad (2)$$

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \quad (3)$$

$$K_p = 0,6 K_u \quad T_i = 0,5 P_u \quad T_d = 0,125 P_u \quad \text{in} \quad T_f = 0,5 T_d \quad (4)$$



Slika 1. Ustaljeno nihanje izhoda y -sistema (zgoraj) in vhoda u -sistema (spodaj)

čenje K_p , integracijska T_i , diferencirna T_d in filtrska T_f časovna konstanta. PID-parametre izračunamo z nastavitvenimi pravili Zigler-Nichols [2] po enačbi (4) ali pa s pomočjo drugih pravil [9], ki tudi uporabljajo K_u in ω_u za njihov izračun.

2.3 Identifikacija

Pomemben del prve faze samonastavljanja je identifikacija modela procesa, ki nam omogoča določiti prenosno funkcijo sistema. Za ta namen potrebujemo poleg K_u in ω_u še mrtvi čas D , ki ga lahko preberemo iz oscilacij pogreška (slika 1 spodaj), ter enosmerno ojačenje, ki ga izračunamo kot $K_s = \frac{\Delta y}{\Delta u}$. Δy predstavlja spremembo na izhodu, Δu pa spremembo na vходу procesa.

Na ta način lahko identificiramo dva različna modela. Model prvega reda z mrtvim časom v enačbi (5) ter model drugega reda z mrtvim časom in z dvema različnima časovnima konstantama v enačbi (6).

$$G_1(s) = \frac{K_s}{T_1 s + 1} e^{-Ds} \quad (5)$$

$$G_2(s) = \frac{K_s}{(T_{21}s + 1)(T_{22}s + 1)} e^{-Ds} \quad (6)$$

Model G_1 vsebuje eno časovno konstanto, ki jo izračunamo z enačbo (7). Za model G_2 pa moramo izračunati dve časovni konstanti po enačbah (8) in (9) kot sistem dveh enačb z dvema neznankama.

$$T_1 = \frac{\sqrt{(K_s K_u)^2 - 1}}{\omega_u} \quad (7)$$

$$\pi = \omega_u D + \tan^{-1}(\omega_u T_{21}) + \tan^{-1}(\omega_u T_{22}) \quad (8)$$

$$\frac{K_s K_u}{\sqrt{[1 + (\omega_u T_{21})^2][1 + (\omega_u T_{22})^2]}} = 1 \quad (9)$$

Identificirana modela bomo kasneje uporabili kot vhod pri samonastavljanju PFC- in mPFC-regulatorjev. Oba sta opisana v naslednjem poglavju.

3 Prediktivno-funkcijski regulator

3.1 Na kratko o vodenju na osnovi modela

Med algoritme za vodenje na osnovi modela spadajo na primer: Model Predictive Heuristic Control [7], Dynamic Matrix Control (DMC) [10] in Predictive functional control [11, 12]. Glavna ideja vodenja na osnovi modela je ta, da se regulirni signal izračuna s pomočjo nekakšnega modela procesa. Ta model je lahko parametričen, lahko je matrika impulznega ali stopničastega odziva, v nekaterih primerih pa tudi mehki model. Tukaj bomo za primerjavo uporabili samo PFC.

3.2 PFC

PFC za računanje regulirnega signala uporablja diskretni parametrični model procesa. Za proces prvega reda lahko zapišemo zvezno prenosno funkcijo kot v enačbi (5). Diskretni ekvivalent te funkcije pa kot:

$$G_m(z) = \frac{b_m}{z - a_m} \quad (10)$$

Regulirni signal PFC-ja izračunamo, kot je predlagano v [7]:

$$u(k) = \frac{1 - a_r^H}{K_s(1 - a_m^H)} e(k) + \frac{1}{K_s} y_m(k) \quad (11)$$

$$e(k) = w(k) - y(k) - y_m(k) + y_{md}(k) \quad (12)$$

V tem primeru je a_r diskretni inkrement referenčne trajektorije, ki se izračuna kot $a_r = e^{-\frac{T_s}{T_r}}$. T_r je časov-

na konstanta referenčne trajektorije, H predikcijski horizont, $y(k)$ izhod procesa, $y_m(k)$ izhod modela procesa brez upoštevanja zakasnitve, $y_{md}(k)$ je izhod modela z upoštevanjem zakasnitve in $w(k)$ nastavitvena točka. Podobno lahko storimo za procese drugega reda (6). Diskretni ekvivalent modela takšnega procesa lahko zapišemo kot:

$$G_{ms}(z) = \frac{b_m}{(z - a_{m1})(z - a_{m2})} z^{-n_d} \quad (13)$$

Ta model nato pretvorimo v vzporedno strukturo:

$$G_{ms}(z) = (G_{m1}(z) + G_{m2}(z))z^{-n_d} \quad (14)$$

$$G_{m1}(z) = \frac{\frac{b_m}{z - a_{m1}}}{z - a_{m1}} \quad (15)$$

$$G_{m2}(z) = \frac{\frac{-b_m}{z - a_{m2}}}{z - a_{m2}} \quad (16)$$

$$u(k) = \frac{(1 - a_r^H)e(k) + y_{12}(k)}{\frac{K_{m1}}{1 - a_{m1}}(1 - a_{m1}^H) + \frac{K_{m2}}{(1 - a_{m2})(1 - a_{m2}^H)}} \quad (17)$$

$$y_{12}(k) = y_{m1}(k)(1 - a_{m1}^H) + y_{m2}(k)(1 - a_{m2}^H) \quad (18)$$

$$e(k) = w(k) - y(k) - y_m(k) + y_{md}(k) \quad (19)$$

Tukaj je a_r zopet diskretni inkrement referenčne trajektorije izračunan kot

$$a_r = e^{-\frac{T_s}{T_r}} \cdot T_r \text{ je časovna konstanta}$$

referenčne trajektorije, T_s pa perioda vzorčenja. H je predikcijski horizont, $y(k)$ izhod procesa, $y_m(k)$ izhod modela procesa brez upoštevanja zakasnitve, $y_{md}(k)$ pa izhod modela z

za modele prvega reda. Dodatna zanka lahko vsebuje svojo prenosno funkcijo. Novo vrednost regulirnega signala pa izračunamo kot:

$$u_{mPFC} = u_{PFC} - G_f(z)(y - y_m) \quad (20)$$

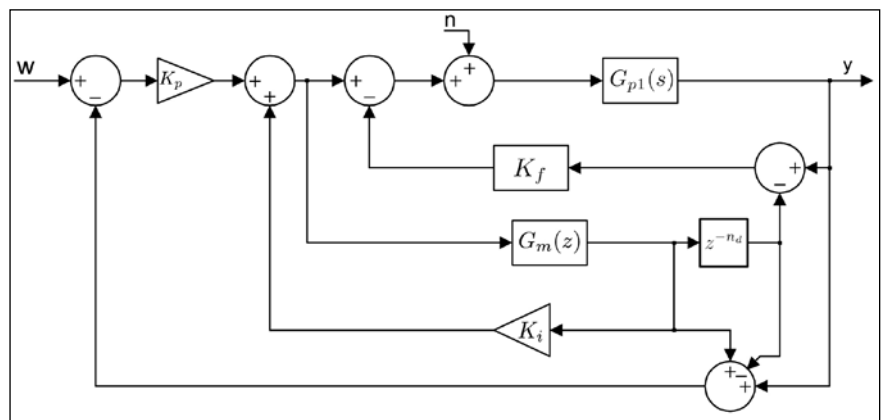
Zaradi dodatne zanke bi morali dobiti sistem z boljšim dušenjem motenj, medtem ko vodenje ne bi bilo različno. To je res, če sta model in proces popolnoma enaka. Med preizkušanjem mPFC smo ugotovili, da dobimo dobre rezultate, če dodatna povratna zanka vsebuje samo ojačanje, za modele prvega reda, oz. PD regulator, za modele drugega reda.

$$G_{f1}(z) = K_f \quad (21)$$

$$G_{f2}(z) = \frac{K_{f2}T_{df}(1 + N_f)z + K_{f2}(N_fT_s - N_fT_{df} - T_{df})}{T_{df}z + N_fT_s - T_d} \quad (22)$$

Na *sliki 2* je $K_p = \frac{1 - a_r^H}{K_s(1 - a_m^H)}$ in $K_i = \frac{1}{K_s}$

Časovna konstanta referenčne trajektorije za modele prvega reda je izračunana kot $T_r = \frac{T}{10}$ in za modele



Slika 2. Bločna shema mPFC-ja za model prvega reda

upoštevanjem zakasnitve. Nadalje je $w(k)$ nastavitvena točka, $y_{m1}(k)$ izhod prvega razstavljenega modela brez zakasnitve ($G_{m1}(z)$) ter $y_{m2}(k)$ izhod drugega razstavljenega modela brez zakasnitve ($G_{m2}(z)$).

3.3 Modificirani PFC

Ideja modificiranega PFC-ja je, da dodamo k regulirnemu signalu še eno negativno povratno zanko iz razlike izhoda procesa in izhoda modela. Na *sliki 2* je to prikazano

drugega reda kot $T_r = 0,1\sqrt{T_{b1}^2 + T_{b2}^2}$. Za modele prvega reda je ojačenje v dodatni zanki $K_{f1} = 20\frac{1}{K_s}$, kjer je K_s enosmerno (DC) ojačenje modela. Parametri dodatne zanke za modele drugega reda pa so $K_{f2} = 2\frac{1}{K_s}$ in $T_{df} = T_s$.

4 Aplikacija na pilotni napravi

Opisane metode so bile preizkušene na pilotni laboratorijski napravi motor-generator, ki je sistem prvega

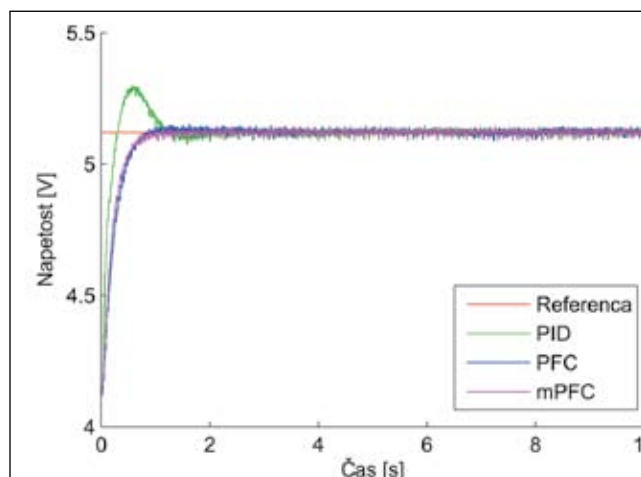
reda. Njegovo delovno območje je med $y = -10$ in $y = 10$ V. S spreminjanjem napetosti na vходу lahko vplivamo na hitrost vrtenja. Za komunikacijo med napravo in PC-jem smo izbrali čas vzorčenja $T_s = 0,01$ s.

Pri eksperimentih smo z isto napravo imitirali tudi sistem drugega reda, ki smo ga realizirali tako, da smo k motorju zaporedno vezali še aktuator:

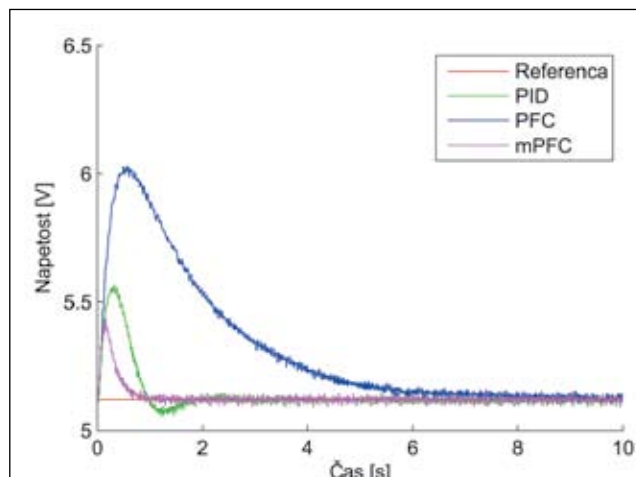
4.1 Sistem prvega reda

Pred začetkom načrtovanih poskusov smo morali najprej opraviti relejski odziv in identifikacijo sistema, ki ju je v skladu s poglavjem 2 vodil razviti algoritem. Ta zahteva en začetni pogoj za pravilno delovanje. To je histereza releja, ki smo jo nastavili na $HS = \pm 0,14$ V. Na podlagi relejskega poskusa smo izračunali

točka v tem primeru je $Y_{00} = 5,12$ V, sprememba reference pa $\Delta r = 1$ V. Opazimo lahko, da imata regulatorja PFC in mPFC hitrejši odziv ($t_{5\%}$ – umiritveni čas, je čas, ki ga potrebuje odziv, da doseže in ostane znotraj 5 % tolerančnega področja okoli ustaljene vrednosti) in manjši prevzpon (PV) kot regulator PID. Če pa pogledamo kvaliteto regulatorjev z vidika integralnih cenilk ITSE



Slika 3. Delovanje sistema prvega reda z uporabo regulatorjev PID (zelena), PFC (modra) in mPFC (roza) pri sledenju referenci v delovni točki $Y_{00} = 5,12$ V



Slika 4. Delovanje sistema prvega reda z uporabo regulatorjev PID (zelena), PFC (modra) in mPFC (roza) pri odzivu na motnjo v delovni točki $Y_{00} = 5,12$ V

$$G_{\text{sistem}}(s) = G_{\text{aktuator}}(s) \cdot G_{\text{motor}}(s) \quad (23)$$

Aktuator ima časovno konstanto $T_a = 0,5$ s in naslednjo prenosno funkcijo:

$$G_{\text{aktuator}}(s) = \frac{1}{T_a s + 1} \quad (24)$$

Tako smo na dveh različnih sistemih izvedli dva poskusa, sledenje referenci in odziv na motnjo, kar nam je omogočilo primerjati podobnosti in razlike med vodenjem motorja z regulatorji PID, PFC in mPFC.

$\omega_u = 11,42$ rad/s in $K_u = 2,15$ ter nato še naslednje PID-parametre:

$$K_p = 1,288, T_i = 0,271 \text{ s}, T_d = 0,068 \text{ s} \text{ in } T_f = 0,034 \text{ s}. \quad (25)$$

Ocenjeni šum je znašal 0,18 % glede na delovno točko $Y_{00} = 5,12$ V. Identificirali smo sledeči sistem prvega reda z mrtvim časom:

$$G_{\text{motor}}(s) = \frac{8,83}{1,63s + 1} e^{-0,02s} \quad (26)$$

Za oba poskusa smo nastavili predikcijski horizont PFC in mPFC na $H = 10$. Izračunali smo tudi $K_f = 2,27$ in $T_r = 0,16$ s.

Slika 3 prikazuje omenjene regulatorje pri sledenju referenci. Delovna

(integralni kvadratični pogrešek, obtežen s časom), ISE (integralni kvadratični pogrešek) in IAE (integral absolutne vrednosti pogreška) v tabeli 1, ugotovimo, da je najbolje ocenjen regulator PID, ki mu sledita mPFC in PFC.

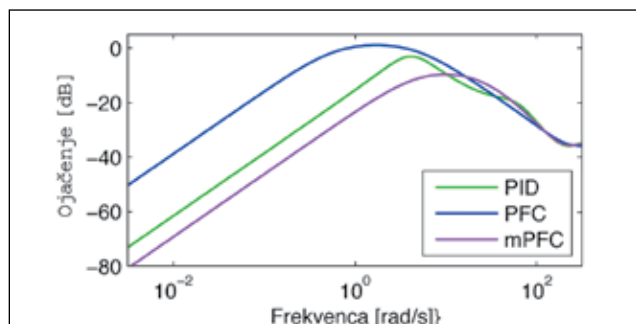
Na sliki 4 je prikazano delovanje regulatorjev pri odzivu na motnjo, ki smo jo generirali kot stopnico na vходу v motor z vrednostjo $\Delta n = 1$ V. Evidentno je, da mPFC deluje bolje od ostalih dveh regulatorjev, saj ima hitrejši odziv, manj PV in boljše ocene na podlagi integralnih cenilk. Kljub počasnejšemu odzivu in večjemu PV je delovanje regulatorja PID sprejemljivo. regulator PFC se

Tabela 1. Prikaz kvalitete regulatorjev PID, PFC in mPFC za sistem prvega reda pri sledenju referenci

	PID	PFC	mPFC
ITSE	1,50	1,93	1,69
ISE	8,46	14,08	12,68
IAE	27,11	31,17	29,12
$t_{5\%}$ (s)	1,04	0,64	0,64
PV (%)	17,72	3,05	2,31

Tabela 2. Prikaz kvalitete regulatorjev PID, PFC in mPFC v za sistem prvega reda pri odzivu na motnjo

	PID	PFC	mPFC
ITSE	3,26	120,03	0,79
ISE	7,83	106,06	1,82
IAE	31,48	196,23	16,07
$t_{5\%}$ (s)	1,46	5,60	0,58
PV (%)	44,55	90,88	31,37



Slika 5. Bodejev diagram sistema prvega reda med odzivom na motnjo, pri uporabi regulatorjev PID (zeleno), PFC (modro) in mPFC (roza)

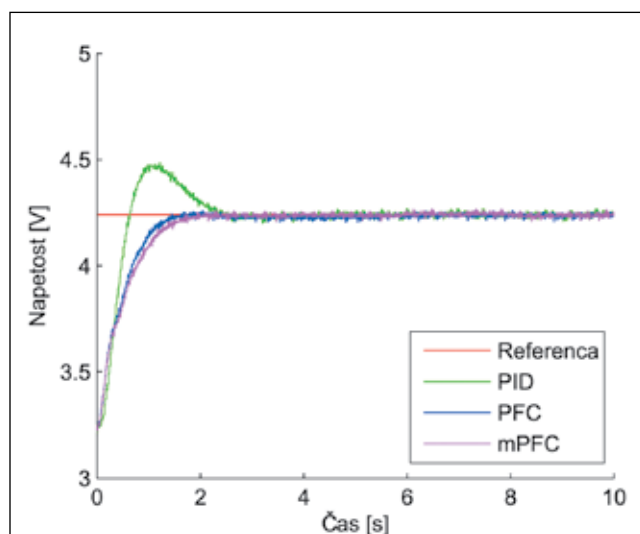
pri odzivu na motnjo ni izkazal najboljše, kar potrjujejo tudi integralske cenilke.

Naredili smo tudi frekvenčno analizo sistema z regulatorji PID, PFC in mPFC. Na *sliki 5* je prikazan frekvenčni odziv sistema, ko motnja na vходу procesa vpliva na njegov izhod. Ugotovimo lahko, da pri nizkih in srednjih frekvencah motnjo najbolj duši mPFC, PID pa malo manj. Pri visokih frekvencah ni večjih razlik med posameznimi regulatorji.

4.2 Sistem drugega reda

V tem primeru smo morali zopet opraviti relejski poskus in identifikacijo sistema pred začetkom eksperimentov, saj gre za drugo napravo. Histerezo releja smo nastavili na $HS = \pm 0,15$ V. Tokrat sta bila določena $\omega_u = 3,33$ rad/s in $K_u = 1,28$ ter izračunani sledeči parametri PID:

$K_p = 0,765$, $T_i = 0,943$ s, $T_d = 0,236$ s in $T_f = 0,118$ s. (27) Izhodni šum je tokrat dosegel 0,21 % glede na delovno točko $Y_{00} = 4,24$ V. Identificiran pa je bil tudi nov model drugega reda z mrtvim časom, ki smo ga uporabili za nastavljanje regulatorjev PFC in mPFC:



Slika 6. Delovanje sistema drugega reda z uporabo regulatorjev PID (zeleno), PFC (modro) in mPFC (roza) pri sledenju referenci v delovni točki $Y_{00} = 4,24$ V

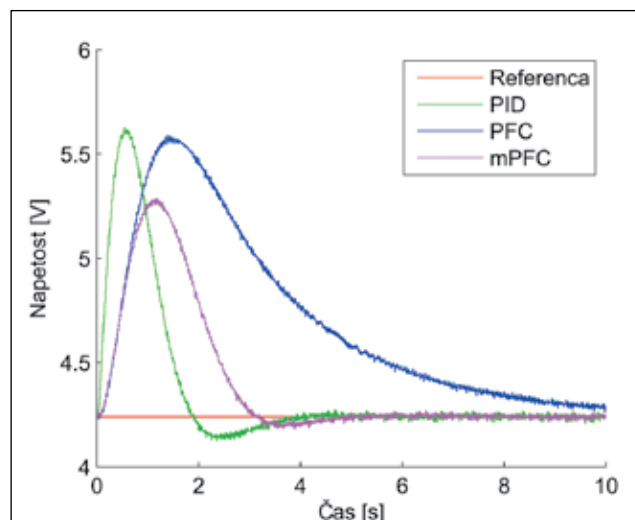
Tabela 3. Prikaz kvalitete regulatorjev PID, PFC in mPFC za sistem drugega reda pri sledenju referenci

	PID	PFC	mPFC
ITSE	9,21	6,47	7,54
ISE	30,34	26,87	28,81
IAE	63,65	54,41	57,91
$t_{5\%}$ (s)	2,14	1,26	1,47
PV (%)	24,32	2,01	2,47

$$G_{2motor}(s) = \frac{8,85}{(2,35s + 1)(0,31s + 1)} e^{-0,27s} \quad (28)$$

V tem primeru smo za oba poskusa izbrali PFC in mPFC predikcijski horizont $H = 10$ ter izračunali $K_{f2} = 0,45$, $T_r = 0,24$ s in $T_{df} = 0,01$. Izbrali smo tudi $N_f = 2$.

Slika 6 prikazuje omenjene regulatorje pri sledenju referenci. Delovna točka v tem primeru je $Y_{00} = 4,24$ V, sprememba reference pa zopet $\Delta r = 1$ V. Kot opazimo, so odzivi zelo podobni tistim na *sliki 3*. *Tabela 3* kaže, da



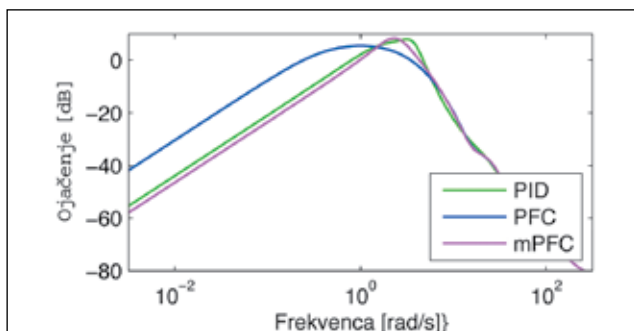
Slika 7. Delovanje sistema drugega reda z uporabo regulatorjev PID (zeleno), PFC (modro) in mPFC (roza) pri odzivu na motnjo v delovni točki $Y_{00} = 4,24$ V

Tabela 4. Prikaz kvalitete regulatorjev PID, PFC in mPFC za sistem drugega reda pri odzivu na motnjo

	PID	PFC	mPFC
ITSE	94,98	856,86	158,23
ISE	137,93	391,82	125,15
IAE	150,84	466,55	171,15
$t_{5\%}$ (s)	3,39	9,97	4,17
PV (%)	138,79	134,85	104,64

regulatorja PFC in mPFC zopet delujeta bolje, saj imata hitrejši odziv ($t_{5\%}$) in manj prevzpona kot PID. Opazimo tudi, da ima v tem primeru regulator PID približno 7 % večji PV kot na *sliki 3*.

Na *sliki 7* je prikazano delovanje regulatorjev pri odzivu na motnjo, ki smo jo generirali kot stopnico na vходу v sistem (23) z vrednostjo $\Delta n = 1$ V. V *tabeli 4* opazi-



Slika 8. Bodejev diagram sistema drugega reda med odzivom na motnjo pri uporabi regulatorjev PID (zelena), PFC (modra) in mPFC (roza)

mo, da ima regulator mPFC manj PV in nekoliko daljši umiritveni čas kot PID, vendar je slednji bolje ocenjen z integralskima cenilkama ITSE in IAE. Cenilka ISE pa boljše ocenjuje regulator mPFC. Tudi v tem eksperimentu sistem najslabše deluje ob uporabi regulatorja PFC.

Tudi za model drugega reda smo naredili frekvenčno analizo sistema z regulatorji PID, PFC in mPFC. Na sliki 8 je prikazan frekvenčni odziv sistema, ko motnja na vhodu procesa vpliva na njegov izhod. Opazimo lahko, da regulatorja PID in mPFC dajeta podobne rezultate in oba boljše kot PFC. Tudi tukaj pri visokih frekvencah ni bistvenih razlik.

■ 5 Zaključek

Cilj tega članka je bil predstaviti vodenje električnega motorja s pomočjo samonastavljivih regulatorjev PID, PFC in mPFC. Dobili smo dobre rezultate, ki kažejo, da regulator mPFC deluje bolje kot PID in PFC, še posebej pri sledenju referenci. Modificirani PFC je tudi hitrejši pri odzivu na motnjo in ima manjši prevzpon. Umiritveni čas regulatorja PID je

sicer primerljiv s časom regulatorja mPFC, vendar ima večji prevzpon.

Viri

- [1] Åström, K., and Hägglund, T.: PID controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd edition, Instrument Society of America, USA, 1995.
- [2] Ziegler, J. G., and Nichols, N. B.: Optimum settings for automatic controllers, Transactions ASME, vol. 64, str.: 759–768, 1942.
- [3] Vrančič, D., Juričič, D., Strmčnik, S., and Hanus, R.: Closed-loop tuning of the PID controller by using MOMI method, American Control Conference, Proceedings, vol. 5, str.: 3352–3356, 1999.
- [4] Chien, I. L., Hrones, J. A., and Reswick, J. B.: On the automatic control of generalised passive systems, Transactions of the ASME, str.: 175–185, 1952.
- [5] Schultz, W. C., and Rideout V. C.: Control system performance measures: Past, present and future, IRE Transactions on Automatic Control, AC-6, str.: 22–35, 1961.
- [6] Kim, J. S., Kim, J. H., Park, J., Park, S., and Choe, W.: Auto Tuning PID Controller based on Improved Genetic Algorithm for Reverse Osmosis Plant, World Academy of Science, Engineering and Technology, str.: 384–389, 2008.
- [7] Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., and Papon, J.: Model predic-
- [8] Yu, C.: Autotuning of PID Controllers, A Relay Feedback Approach, str.: 23–25, 2nd Edition, Springer, Germany, 2006.
- [9] O'Dwyer, A.: Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, pp. 235–240, 2nd Edition, Imperial College Press, London, 2006.
- [10] Cutler, C. R., and Ramaker, B. L.: Dynamic matrix control – A computer control algorithm, JACC Proceedings, Paper WP5-B, 1980.
- [11] Richalet, J., O'Donovan, D.: Predictive Functional Control: Principles and Industrial Applications, Springer, London, 2009.
- [12] Richalet, J.: Pratique de la commande prédictive, Paris, Hermès, 1993.



Zahvala

Zahvaljujemo se Kompetenčnemu centru za sodobne tehnologije vodenja, 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 raziskavo.

DC motor control using auto-tuning PID, PFC and modified-PFC controllers

Abstract: This paper presents a DC motor control using the auto-tuning of PID, PFC and modified-PFC controllers. Auto-tuning is a modern approach to tuning controllers, which helps us to tune controllers more quickly than standard tuning methods. The auto-tuning of PID, PFC and modified-PFC controllers is performed by using the relay-feedback method. After sustained oscillation of the process output, an identification of the process model can be made. The PFC and modified-PFC controllers are then tuned and the PID parameters are calculated. Experiments on DC motor-generator shows that the modified-PFC controller gives better results than the other two.

Keywords: auto-tuning, PID, modified, PFC, mPFC, relay, feedback, controller, DC, motor, control