

PRIMENA PREDIKTIVNIH FILTARA UMETO UNUTRA[NJEG MODELA POREME]AJA IMPACT STRUKTURE

Mili} R. Stoji}, *Elektrotehni-ki fakultet u Beogradu*
Milan S. Matijevi}, *Ma}inski fakultet u Kragujevcu*

**Sadr`aj** – U radu je prikazana varijanta IMPACT (*Internal Model Principle and Control Together*) strukture pogodna za digitalno upravljane električne pogone. Predla`u se modifikacije strukture u cilju potiskivanja efekata {uma kvantovanja u sistemu. Pokazano je da se primenom prediktivnih filtara u ulozi polinoma predvi`anja mogu ostvariti iste ili bolje performanse sistema nego u slu-aju primene opservera pro}irenog modelom poreme}aja. Ova struktura je znatno jednostavnija, sa malim brojem pode}ljivih parametara unutar unutra[njeg modela, kojima se pregledno i relativno jednostavno mo`e uticati na robustne, filtarske i dinami-ke performanse sistema.

1. UVOD

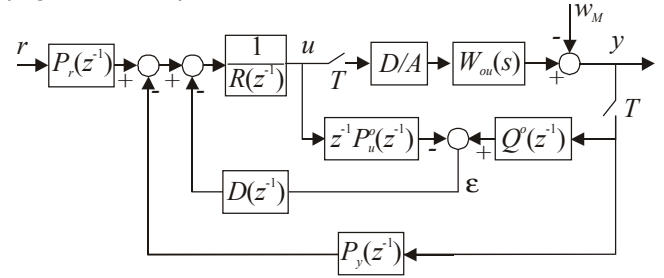
U savremenim alatnim ma}inama i ma}inskim sistemima, koji treba da obezbede visok kvalitet proizvoda i veliku produktivnost, zahtevaju se velika tačnost rada i visoke dinami-ke performanse brzinskih i pozicionih servomehanizama sa razli-itim motorima u ulozi izvr{nog organa. Te`i se da se postigne nominalna gre{ka pra`enja na nivou rezolucije senzora u stacionarnom stanju i u prelaznom re`imu, kao i visok stepen robustnosti sistema. Pokazaćemo da se ovi zahtevi mogu se postići IMPACT strukturom [1 - 4].

Primene IMPACT strukture na digitalno upravljane električne pogone ne zahtevaju re{avanje Diophantineovih jedna-ina u procesu sinteze. Naime, zbog odsustva transportnog ka{njenja u modelu objekta upravljanja, unutra[nji model poreme}aja mo`e biti definisan polinomom predvi`anja [2]. Iz istog razloga, sinteza spoljne konture IMPACT strukture se izvodi jednostavno prema opštem postupku sinteze IMPACT strukture [3]. Me}utim, struktura pokazuje osetljivost na efekte kvantovanja u slu-aju merenja ugaone pozicije vratila motora enkoderom ili rizolverom ograni-ene rezolucije [2]. Osetljivost na {um je vi{e izra`ena u sintezi brzinskog servomehanizma i zato je u [2] predlo`ena modifikovana IMPACT struktura koja uklju-uje estimator ugaone brzine vratila motora. Primenjen je opserver visokog kvaliteta koji i pri dejstvu poreme}aja korektno procenjuje koordinate stanja i potiskuje efekte {uma kvantovanja. U ovom radu se predla`e jednostavnije, ali podjednako efikasno re{enje. Uspostavljena je veza izme}u polinoma predvi`anja i Newtonovog prediktora i predlo`ena je primena polinomnih prediktivnih filtara umesto klasi-nog polinoma predvi`anja.

2. STRUKTURA SISTEMA I POSTUPAK SINTEZE

Na Sl.1 prikazan je IMPACT struktura za objekat upravljanja koji ne sadr`i transportno ka{njenje. Struktura mo`e biti primenjena u slu-aju digitalno upravljanih elektromotornih pogona [1,3]. Signal w_M modelira uticaj momenta optere}enja na izlaz sistema y (ugaonu brzinu ili poziciju). Upravljačka struktura na Sl.1 uzima u obzir dinamiku dava-a tipa apsolutnog enkodera ili rizolvera sa rizolver/digitalnim (R/D) konvertorom, kao i kona-nu du`inu

digitalne re-i D/A konvertora. Me}utim, usled kona-ne du`ine re-i R/D konvertora, digitalni merni signal pozicije i estimirani signal brzine poseduju {um kvantovanja [2], koji izaziva fluktuacije upravlja-ke i upravljane promenljive i pove}ava gubitke u motoru. Otuda je potiskivanje {uma kvantovanja imperativ upravlja-ke strukture elektromotornog pogona visokih performansi.



Sl. 1. IMPACT struktura digitalnog sistema upravljanja

Objekat upravljanja $W_o(s)$ na Sl.1 mo`e biti predstavljen svojim nominalnim diskretnim modelom

$$W^o(z^{-1}) = \frac{z^{-1-k} P_u^o(z^{-1})}{Q^o(z^{-1})}$$

koji je u vidu dvoulaznog unutra[njeg modela objekta upravljanja ugrađen u upravljački deo strukture. Signal ϵ estimira uticaj generalisanog poreme}aja koji u sebi objedinjuje spoljni poreme}aj i neodre}enosti nominalnog modela objekta. Neodre}enosti modeliranja mogu biti adekvatno opisane multiplikativnom granicom neodre}enosti $\alpha(\omega)$ [4]

$$W(z^{-1}) = W^o(z^{-1})(1 + \delta W(z^{-1})) \quad (1)$$

$$|\delta W(e^{-j\omega T})| \leq \alpha(\omega), \quad \omega \in [0, \pi/T]$$

Tada, sistem na Sl. 1 ispunjava uslov robustne stabilnosti ako je nominalni sistem stabilan i ispunjena relacija

$$\alpha(\omega) < \left| \frac{Q^o(z^{-1})R^o(z^{-1}) + z^{-1}P_u^o(z^{-1})P_y(z^{-1})}{z^{-1}P_u^o(z^{-1})(P_y(z^{-1}) + Q^o(z^{-1})D(z^{-1}))} \right|_{z^{-1}=e^{-j\omega T}}, \quad \omega \in [0, \pi/T]$$

{to je uslov radne sposobnosti sistema. Robustna performansa sistema se posti`e funkcionisanjem unutra[nje konture sistema. Naime, zadatak unutra[nje konture jeste da potisne efekte generalisanog poreme}aja na izlaznu promenljivu. Saglasno principu apsorpcije [3,4], projektuje se unutra[nji model poreme}aja na koji se dovodi signal ϵ . U slu-aju objekta upravljanja bez transportnog ka{njenja, unutra[nji model poreme}aja se svodi na polinom predvi`anja $D(z^{-1})$ [3, 4]

$$(1 - D(z^{-1}))\epsilon(z^{-1}) = 0, \quad t = nT \geq (\deg(1 - D(z^{-1})))T$$

Svrha principa apsorpcije je da uklju-i model poreme}aja u upravlja-ku strukturu u cilju potiskivanja uticaja poreme}aja na stacionarnu vrednost upravljane promenljive. Za poznatu klasu poremećaja, polinom predvi`anja $D(z^{-1})$ se odre}uje jednostavno, polaze}i od modela poreme}aja u vremenskom

$$D(z^{-1}) = 2 - z^{-1} \quad (2)$$

$$R(z^{-1}) = P_o^o(z^{-1}) \quad (3)$$

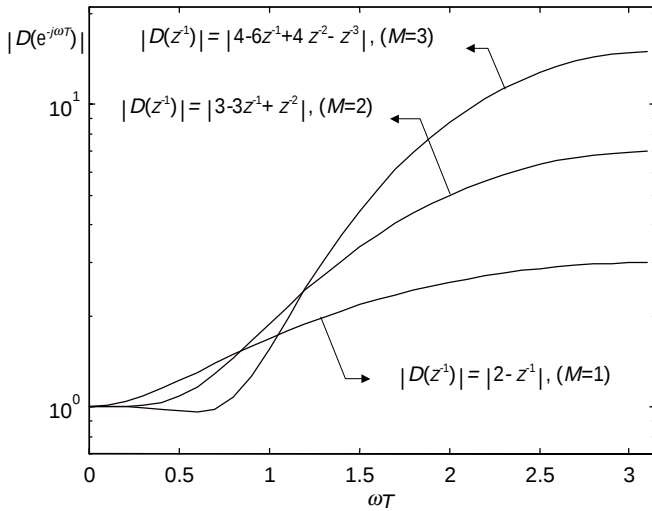
$$G_{de}(z^{-1}) = \frac{z^{-1}P_r(z^{-1})}{O^o(z^{-1}) + z^{-1}P_v(z^{-1})} \quad (4)$$

3. POLINOMNI PREDIKTIVNI FILTRI U ULOZI POLINOMA PREDVIĐANJA

Pretpostavimo da odbirak signala $\varepsilon(k)$ može biti predstavljen sledećim polinomom

gde su koeficijenti polinoma a_i nepoznate realne konstante. Zajedni-ka atraktivna osobina polinomnih prediktora je da njihova sinteza ne zavisi od tekućih polinomnih koeficijenata. Tako, funkcija diskretnog prenosa Newtonovog prediktora, koji estimira signal tipa (5) sa horizontom predikcije od p odbiraka (tj. $\hat{x}(k+p)$), je oblika

Prediktivan filter (6) procenjuje vrednost odbirka $\hat{\varepsilon}(k+p)$ na osnovu $M+1$ prethodnih odbiraka signala $\varepsilon(k)$, dok je za specijalan slu-aj $M = 1$ i $p = 1$ identi-an polinomu predvi|anja (2). Uop{te, kada je re- o primeni u elektromotornim pogonim, usled odsustva transportnog ka{njjenja u objektu upravljanja, gotovo je uvek slu-aj $p=1$. Filterske sposobnosti polinoma predvi|anja polinomnih signala (signala tipa (5)), odnosno Newtonovog polinomnog filtera, ilustrovane su na Sl.3. Dijagrami na Sl.3. pokazuju da je se komponenta {uma u signalu poja-ati, i da osetljivost na {um postaje ve-a sa pove|anjem reda filtera. [tavi-e, svi polinomni prediktori imaju istu karakteristiku: sa pove-anjem stepena modela polinoma pove|ava se osetljivost na {um [6]. Linearna aproksimacija signala ($M=1$) mo-e biti prihva}ena kao adekvatna, {to ima svoje prednosti i sa gledi{ta osetliivosti sistema na {um.



Sl. 3. Amplitudno frekventijske karakteristike Newtonovog prediktivnog filtra za $p=1$ i $M=1, 2$ i 3

LSN (Linear Smoothed Newton) prediktor predstavlja poboljšanje klasičnog Newtonovog prediktora koje se sastoji u tome da se M -ta razlika ulaznog signala propušta kroz NF filter $S(z^{-1})$ [6]. Ukoliko se pretpostavlja da je signal $\sim$ iju predikciju želimo da dobijemo adekvatno modeliran polinomom M -tog reda, jasno je da je M -ti izvod takvog signala konstanta, te je to osnovni razlog što se baš aproksimacija M -tog izvoda filtrira [6]. Na taj način su efekti kašnjenja koje unosi NF filter najmanje izraženi (filtriranjem konstante). U općem slučaju, funkcija diskretnog prenosa LSN prediktora je data relacijom

$$H_{M,LSN}^p(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{M-1} (1 - z^{-p})^i + S(z^{-1})(1 - z^{-p})^M \quad (7)$$

Ovakva modifikacija polinoma predviđanja je posebno privlačna za primenu zbog svoje jednostavnosti. Takođe, jednostavnosti radi, moguće je izabrati filter sa jednim podepljivim parametrom jasnog fizičkog značenja

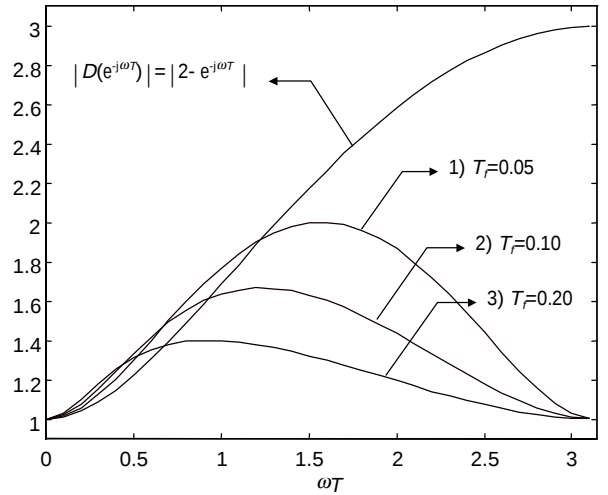
$$S(z^{-1}) = \frac{1}{T_f s + 1} \bigg|_{s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} = \frac{T(1+z^{-1})}{2T_f + T + (T - 2T_f)z^{-1}} \quad (8)$$

Filtarske sposobnosti ovako projektovanog LSN prediktivnog filtra su ilustrovane na Sl. 4, za $M=1$, i $T=0.1$ s. Očigledno je da LSN prediktivni filter ne potiskuje komponente ulaznog signala, ali ih zato znatno manje pojačava u odnosu na polinom predviđanja (2). IMPACT struktura sa LSN prediktivnim filtrom, korištenim umesto polinoma predviđanja, je po svojim performansama vrlo konkurentna IMPACT strukturi na Sl.2 [1].

RLSN (Recursive Linear Smoothed Newton) prediktivni filter

$$H_{M,RLSN}^p(z^{-1}) = \frac{c_p + S(z^{-1})(1 - z^{-p})^M + z^{-1} \sum_{i=0}^{M-1} H_{M-i,RLSN}^1(z^{-1})(1 - z^{-p})^i}{1 - (1 - c_p)z^{-p}}$$

za specijalan slučaj $M=1$ i $p=1$, može biti tumačen kao sledeća modifikacija polinoma predviđanja (2). Suština ove modifikacije, u odnosu na LSN prediktor, se sastoji u uvođenju povratne sprege koja treba da ublaži brze varijacije ulaznog signala u filter. Konstanta c_p ima vrednosti između nule i jedinice.



Sl. 4. Amplitudno frekventijske karakteristike LSN prediktora i polinoma predviđanja

Specijalan slučaj RLSN prediktora ($c_p = 1$), daje LSN prediktor, te je otuda očigledno da implementacija RLSN prediktivnog filtra u IMPACT strukturi pruža više mogućnosti. Parametar $c_p < 1$ omogućava da RLSN prediktor ima amplitudno frekventijsku karakteristiku NF filtra. U [1] je pokazano kako promenom parametra c_p može uticati na proširenje oblasti robustne stabilnosti u području srednjih učestanosti. U [1] je takođe ilustrovana efikasnost ovog filtra kada je implementiran u IMPACT strukturu umesto polinoma predviđanja (2). Neznatno je bolje prigušenje kvantovanja u odnosu na strukturu sa proširenim opservatorom [2], a istovremeno je i manje narušena dinamika apsorpcije poremećaja. Ipak, radi se o neznatnim poboljšanjima, dok se sa druge strane postupak podešavanja parametara (c_p i T_f) unutrašnjeg modela usloňuje. Otuda je pogodnije koristiti jednostavniju strukturu sa LSN prediktorom, ukoliko se njenim korišćenjem postiže adekvatna performansa sistema.

4. ILUSTRATIVNI PRIMER

Efikasnost polinomnog LSN prediktora u ulozi polinoma predviđanja IMPACT strukture biće ilustrovana simulacijom, pod istim uslovima kao u [2]. Razmatra se kritični slučaj potiskivanja brzih kvantovanja u sintezi brzinskog servomehanizma. Perioda odabiranja je $T = 0.1$ s. Za objekat upravljanja je usvojen jednosmerni motor (U12M4T) upravljajući strujom u rotoru, sa $K = 4.38$ i $T_m = 0.32$ s, i u skladu sa takvim modelom objekta i željenom funkcijom spregnutog diskretnog prenosa sistema

$$G_{de}(z^{-1}) = \frac{0.312898z^{-1} - 0.259182z^{-2}}{1 - 1.687103z^{-1} + 0.740818z^{-2}}$$

dobijeni su sledeći elementi upravljačke strukture

$$z^{-1}P_u(z^{-1}) = 1.1765z^{-1}, \quad Q^o(z^{-1}) = 1 - 0.73146z^{-1},$$

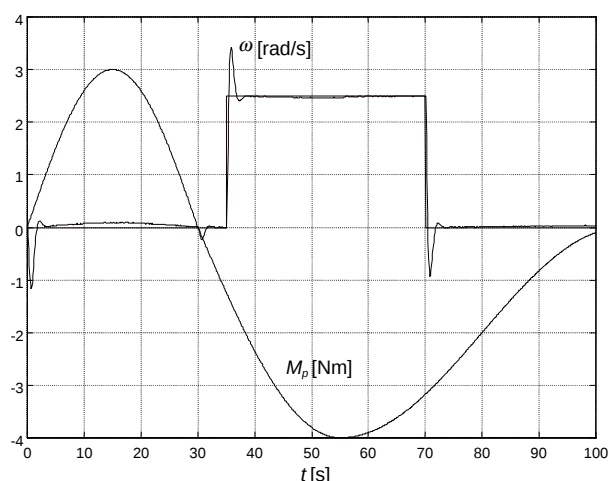
$$R(z^{-1}) = 1.1765,$$

$$P_y(z^{-1}) = -0.955642 + 0.740818z^{-1} \quad (9)$$

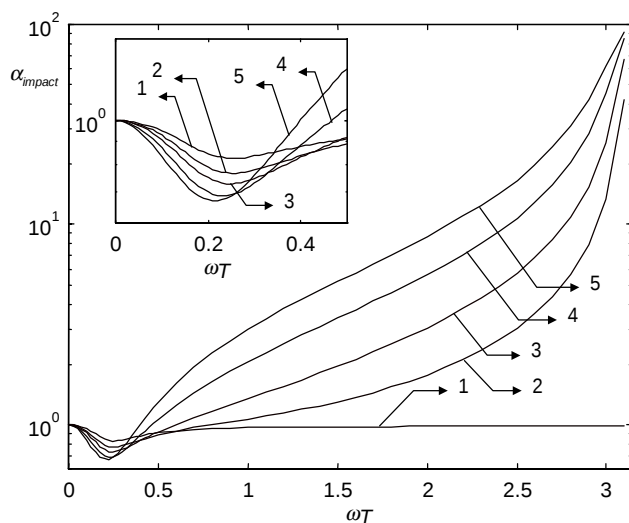
$$P_r(z^{-1}) = 0.312898 - 0.259182z^{-1}$$

Kao i u [2], simuliran je rad sistema sa 16-bitnim D/A konvertorom i rizolverom sa 12-bitnim R/D konvertorom (Sl.5). Standardna devijacija razlike signala izlaza iz sistema kada je brzina kvantovanja uzeta u obzir i kada to nije učinjeno, u slučaju IMPACT strukture sa LSN prediktorom (Sl.5)

iznosi za 12% manje nego u slu-aju strukture sa opserverom [2]. Povećavanjem vremenske konstante T_f , {um kvantovanja bi u jo{ ve}oj meri bio potisnut, ali bi u sli-noj meri bila naru{ena dinamika upijanja efekata poreme}aja. Primenom LSN prediktivnog filtra umesto polinoma predvi|anja, dobija se pribli`no ekvivalentan rezultat kao u slu-aju implementacije opservera u IMPACT strukturi, ali ovoga puta struktura se bitno pojednostavljuje. Promenom parametra T_f sada je na jednostavan i jasan na-in mogu}e uticati na dinami-ke osobine sistema, na potiskivanje {uma kvantovanja, ali i na oblast robustne stabilnosti sistema (Sl.6).



Sl. 5 IMPACT struktura brzinskog servomehanizma sa LSN prediktorom ($T_f = 0.2s$)



Sl. 6. Amplitudno frekvencijske karakteristike komplementarne funkcije osetljivosti IMPACT strukture sa 1) polinomom predvi|anja (2); i sa LSN prediktorom za 2) $T_f=0.05$, 3) $T_f=0.1$, 4) $T_f=0.2$, 5) $T_f=0.33$,

5. ZAKLJU^AK

Umesto polinoma predvi|anja, u sintezi IMPACT strukture brzinskog ili pozicionog servomehanizma predlo`ena je upotreba jednostavnog LSN prediktora sa jednim pode{ljivim parametrom koji ima fizi-ko zna-enje ( $T_f$ ). Povećanjem parametra  $T_f$  posti`u se bolje filtarske osobine

sistema i ve}a robustnost, pogotovu na podru-iju vi{ih u-estanosti. Jasno je da ve}e vrednosti T_f zna-e i sporiju dinamiku apsorpcije poreme}aja, i suprotno. Me|utim, rezultati simulacije jasno pokazuju da se mo`e na}i kompromisno re{enje sa kojim je zadovoljen zahtev za `eljenom dinamikom sistema i u slu-aju dejstva poreme}aja, a istovremeno postignute i bolje robustne i filtarske performanse sistema. Jedan pode{ljiv parametar kojim se sve to reguli{e, daje predlo`enoj strukturi posebnu prednost.

LITERATURA

- [1] M.S. Matijevi}, "Razvoj novih struktura digitalno upravljanih elektromotornih pogona i industrijskih procesa", doktorska disertacija, Ma{inski fakultet u Kragujevcu, 2001.
- [2] M.S. Matijevi}, M.R. Stoji}, "Sinteza sistema digitalnog upravljanja brzinskim servomehanizmom sa unutra{njim modelom: Potiskivanje {uma kvantovanja", *Zbornik XLII Konf. ETRAN-a*, s. 291-294., Vrnja-ka Banja, 1998.
- [3] Я.З. Цыпкин, "Синтез робастно оптимальных систем управления объектами в условиях ограниченной неопределенности", *Автом. и Телемех.*, №9, с. 139-159, 1992.
- [4] Ya.Z. Tsyppkin and U. Holmberg, "Robust stochastic control using the internal model principle and internal model control", *Int. J. Control*, vol. 61, №4, P 809-822, 1995.
- [5] S.J. Ovaska, "Guest editorial special section on predictive and delayless methods in control instrumentation", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 46, №5, pp. 874, 1999.
- [6] S. V{aliviita, S.J. Ovaska and Olli Vainio, "Polynomial predictive filtering in control instrumentation: A review", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 46, №5, pp. 876-888, 1999.
- [7] M.S. Matijevi}, M.R. Stoji}, "Novi prilazi parametarske sinteze IMPACT strukture", *Zbornik XLVI Konf. ETRAN-a, Tesli}*, 2002.

Abstract – The IMPACT structure suitable for suppressing of quantization noise in digitally controlled electrical drives has been presented. It was shown that by the application of predictive filters as predictive polynomials one may obtain the same or even the better system performance then by using of observer extended by the model of disturbance. The presented structure is simple with small number of adjustable parameters that could be easily set to achieve the desired robust, filtering, and dynamic properties of the system.

APPLICATION OF PREDICTIVE FILTERS INSTEAD OF INTERNAL MODEL OF DISTURBANCE IN IMPACT STRUCTURE

Mili} R. Stoji} and Milan S. Matijevi}