

UNUTRAŠNJI MODELI U UPRAVLJANJU ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Milić R. Stojčić¹ and Milan S. Matijević²

Abstract – U radu je dat pregled upravljačkih koncepata koji eksplicitno koriste model upravljanog elektromotornog pogona unutar upravljačke strukture, pre svega, radi estimacije i kompenzacije poremećaja. Posebno je opisana primena IMPACT (Internal Model Principle and Control Together) strukture na digitalno upravljane elektromotorne pogone i predložene njene modifikacije u cilju poboljšanja upravljačkih performansi i jednostavnijeg podešavanja strukture.

Keywords – IMP (Internal Model Principle), IMC (Internal Model Control), IMPACT (Internal Model Principle and Control Together), DOB (Disturbance Observer), MBDA (Model Based Disturbance Attenuator)

I. INTRODUCTION

U mnogim aplikacijama kod savremenih mašinskih sistema, kao što su uređaji za proizvodnju mikroelektronskih sklopova, robotski manipulatori, sistemi za memorisanje podataka, alatne mašine koje treba da obezbede visok kvalitet proizvoda i visoku produktivnost proizvodnih linija, zahtevaju se visoke dinamičke performanse brzinskih i pozicionih servomehanizama sa različitim motorima u ulozi izvršnog organa. Pri kontroli kretanja mehaničkog sistema postaje nužno ostvariti nominalnu grešku praćenja na nivou rezolucije senzora, bez obzira na prisustvo generalisanog poremećaja, koji obuhvata dejstvo spoljnih poremećaja i eventualne neodređenosti i promene dinamičkih karakteristika objekta upravljanja. Otuda se primena Tsytkinove IMPACT strukture [1-4] u sintezi digitalno upravljanog elektromotornog pogona nameće kao logično rešenje.

IMPACT struktura je novijeg datuma i objedinjuje prednosti struktura zasnovanih na IMP (Internal Model Principle) i IMC (Internal Model Control) [3]. Kao što je poznato, IMP podrazumeva uvođenje modela poremećaja u strukturu sistema radi kompenzacije uticaja poznate klase poremećaja na upravljaju promenljivu. IMC struktura nije pogodna za apsorpciju proizvoljne klase poremećaja, ali je pogodna za projektovanje robustne stabilnosti i robustne performanse. Slično IMPACT strukturi, u cilju potiskivanja efekata poremećaja na izlaznu promenljivu, svoju primenu u sintezi upravljanja elektromotornih pogona visokih performansi nalaze i strukture koje podrazumevaju korišćenje opserversa poremećaja [1]. Sve pomenute strukture mogu biti tumačene kao strukture sa unutrašnjim modelom.

U ovom radu biće opisana IMPACT struktura, i njene modifikacije koje su omogućile primenu strukture u realnim eksploatacionim uslovima. Predložena je modifikovana struktura sa malim brojem podešljivih parametara kojima se jednostavno direktno utiče na robustnu performansu sistema. Zbog sve veće popularnosti i principijelne sličnosti Tsytkinovoj IMPACT strukturi, ovde će biti dat pregled struktura sa opserversom poremećaja i ukratko komentarisane glavne osobine.

¹Milić R. Stojčić is with the Faculty of Electrical Engineering, Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Yugoslavia, E-mail: estojevic@etf.bg.ac.yu

²Milan S. Matijević is with the Faculty of Mechanical Engineering, Sestre Janjic 6, 34000 Kragujevac, Yugoslavia, E-mail: milanm@knez.uis.kg.ac.yu

II. STRUKTURA SA OPSERVEROM POREMEĆAJA

Prema [5], polaznu ideju o sintezi servosistema sa opserversom poremećaja (DOB) dao je Ohnishi [6], koju su zatim pročitili i značajno unapredili Umeno i Hori [7]. Struktura na Sl. 1. [5], koju su predložili Umeno i Hori [7], je kasnije često eksploatisana i prilagođavana konkretnim aplikacijama, i još uvek je predmet istraživanja inženjera upravljanja.

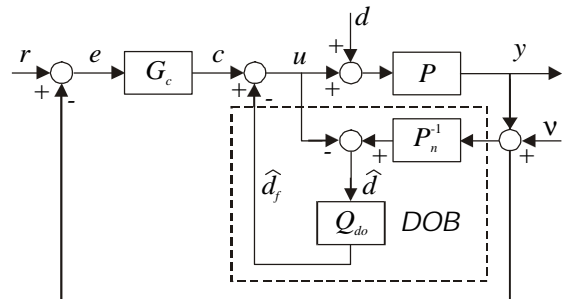


Fig. 1. Tipična struktura sa opserversom poremećaja

Na Sl. 1, objekat upravljanja je označen funkcijom prenosa P , dok je njegov nominalni model predstavljen funkcijom prenosa P_n . Opserver poremećaja (DOB) estimira poremećaj koristeći inverzni nominalni model objekta upravljanja P_n^{-1} .

Signali \hat{d} i \hat{d}_f jesu estimirani signali poremećaja, pre i posle filtriranja NF filtrom Q_{do} . Funkcija opserversa poremećaja jeste estimacija generalisanog poremećaja i njegova kompenzacija, pri čemu se poboljšava i robustna performansu sistema [1, 5]. U tom smislu, kako će kasnije biti pokazano, analogija sa unutrašnjim modelom kod IMPACT strukture je evidentna. U principu, sinteza opserversa poremećaja se sastoji u sintezi filtra Q_{do} [5, 7]. Izbor filtra Q_{do} je ključno pitanje kojim se rešava kompromis između robustne stabilnosti i osetljivosti na šum sa jedne strane, i sposobnost sistema da otkloni negativne uticaje spoljnih poremećaja, sa druge strane [8]. Opserver poremećaja sa adekvatno projektovanim filtrom Q_{do} značajno doprinosi eliminaciji uticaja poremećaja, robustnoj stabilnosti i robustnoj performansi projektovanog sistema sa zatvorenom povratnom spregom [1]. Idealno, opservers poremećaja će potisnuti poremećaje na niskim frekvencijama i obezbediti da objekat koga “vidi” spoljna kontura (objekat definisan funkcijom prenosa y/c) ima karakteristike nominalnog modela [8]. Na taj način, otklanjanjem posledica nepreciznosti modeliranja, koje su neminovno sadržane u nominalnom modelu objekta, opservers poremećaja omogućava da i feedforward kontroler, čija je sinteza zasnovana na nominalnom modelu objekta, ne gubi na efikasnosti [8]. Dakle, osnovna ideja pri sintezi opserversa poremećaja je da se u što većoj meri, ili u frekvencijskom opsegu od značaja, ostvari dinamika unutrašnje konture (od c do y) koja

odgovara nominalnom modelu P_n . Otuda je uobičajen prilaz [8] da se objekat upravljanja sa opserverom poremećaja posmatra kao poseban podsistem, te se pristupa analizi sledećih funkcija prenosa

$$\begin{aligned} G_{cy} &= \frac{PP_n}{P_n + Q_{do}(P - P_n)} \\ G_{dy} &= \frac{PP_n(1 - Q_{do})}{P_n + Q_{do}(P - P_n)} \\ G_{ny} &= \frac{PQ_{do}}{P_n + Q_{do}(P - P_n)} \end{aligned} \quad (1)$$

Ukoliko bi bilo usvojeno da je $Q_{do} \equiv 1$ (što je samo hipotetički slučaj pošto P_n^{-1} nije kauzalno), sistem bi bio u mogućnosti da u potpunosti poništi uticaj i spoljašnjih ($G_{dy} \equiv 0$) i prameterskih poremećaja ($G_{cy} \equiv P_n$), ali tada bi merni šum ostao neprigušen ($G_{ny} \equiv -1$). Suprotno, izborom $Q_{do} \equiv 0$, merni šum je eliminisan ($G_{ny} \equiv 0$), ali tada opserver poremećaja ne doprinosi potiskivanju efekata generalisanog poremećaja ($G_{cy} \equiv G_{dy} \equiv P_n$ - zapravo, ovo je slučaj kada sistem i ne sadrži opserver poremećaja). Kako je obično merni šum signal u opsegu visokih frekvencija, a signal poremećaja se uglavnom nalazi u opsegu nižih frekvencija, jasno je da Q_{do} treba da bude NF filtar [1]. Izbor frekvencijske propustnosti i selektivnosti NF Q_{do} filtra imaju ključan uticaj na performanse opservera poremećaja, a samim tim i sistema sa zatvorenim povratnom spregom. Naučna rasprava o postupku sinteze filtra Q_{do} je još uvek aktuelna. Umenio i Hori [7] su koristili Butterworthov filtar Q_{do} , i zaključili da povećanje reda filtra doprinosi boljoj robustnosti, ali nema pozitivne efekte po potiskivanje efekata mernog šuma. Lee i Tomizuka [5] su koristili binomni NF filter u sintezi opservera poremećaja, itd. U načelu, veća frekvencijska propustnost opserverskog filtra Q_{do} doprinosi boljoj performansi praćenja referentnog signala, mada prekomerno povećanje propustnog opsega može da destabilizuje sistem [1]. Čest pristup predstavlja sinteza filtra opservera u frekvencijskom domenu, korišćenjem funkcije osetljivosti i komplementarne funkcije osetljivosti opservera poremećaja [5]. U načelu, takav prilaz pruža mogućnost projektovanja filtarskih osobina sistema na frekvencijskom opsegu od interesa. Međutim, dosadašnje iskustvo iz mnogobrojnih aplikacija sa opserverom poremećaja navodi na zaključak da je primena opservera poremećaja efikasna pre svega na opsegu niskih frekvencija [5-9]. U [9] je robustnost strukture sa opserverom poremećaja aproksimativno analizirana, pri čemu je izveden zaključak da u analiziranom slučaju multiplikativna granica neodređenosti ne može biti veća od 100%. Upravo u nameri da se dobije izrazito robustan servosistem, na istim principima na kojima je zasnovana is struktura na Sl. 1, predložena je struktura na Sl. 2 i nazvana Model-Based Disturbance Attenuator (MBDA) [10]. Svakako, radi se o strukturi sa opserverom poremećaja, koja se suštinski ne razlikuje od strukture na Sl. 1, ali čija je sinteza ipak u načelu drugojačija (recimo, funkcija prenosa predstavlja P ili

PI kompenzator). Specifičnosti sinteze ove strukture ovde neće biti analizirane.

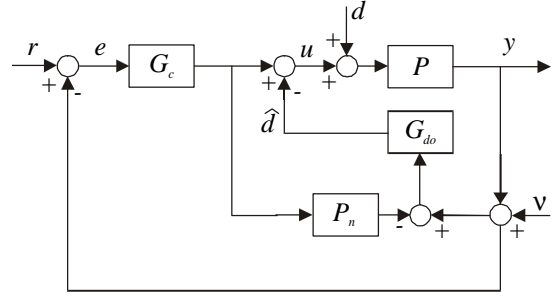


Fig. 2. Struktura sa opserverom poremećaja - MBDA

III. IMPACT STRUKTURA

Na Sl. 3 je prikazan specijalan slučaj IMPACT strukture kada objekat upravljanja ne sadrži transportno kašnjenje, i koji može biti primenjen u slučaju digitalno upravljanih elektromotornih pogona [1, 3]. Signal w_M modelira uticaj momenta opterećenja na izlaz sistema y - odnosno na signal ugaone brzine ili pozicije, zavisno od toga da li se radi o brzinskom ili pozicionom servomehanizmu, respektivno.

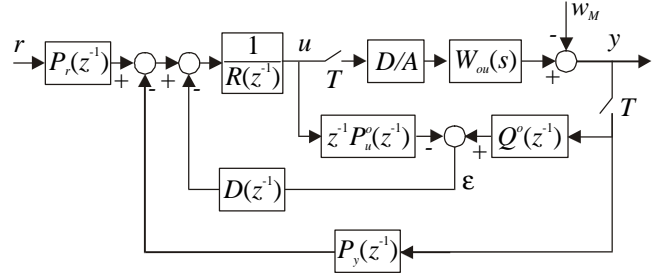


Fig. 3. IMPACT struktura digitalnog sistema upravljanja

Upravljački deo strukture na Sl. 1 je dat u funkciji polinoma po kompleksnoj promenljivoj z^{-1} . Objekat upravljanja $W_{ou}(s)$ može biti predstavljen svojim nominalnim diskretnim modelom

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

koji je eksplicitno implementiran u strukturi kao nominalni dvoulazni unutrašnji model objekta upravljanja. Signal e estimira uticaj generalisanog poremećaja na upravljaju promenljivu, odnosno uticaj spoljašnjeg poremećaja i neodređenosti nominalnog modela objekta. Nepreciznosti modeliranja mogu biti adekvatno opisane multiplikativnom granicom neodređenosti $a(w)$ [4]

$$W(z^{-1}) = W^o(z^{-1})(1 + dW(z^{-1})) \quad (2)$$

$$|dW(e^{-j\omega T})| \leq a(w), \quad w \in [0, p/T]$$

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

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

što je praktično uslov radne sposobnosti sistema. Robustna performansa sistema se postiže funkcionisanjem unutrašnje konture sistema. Naime, zadatak unutrašnje konture jeste da

potisne efekte generalisanog poremećaja na izlaznu promenljivu. Saglasno principu apsorpcije [3,4] projektuje se unutrašnji model poremećaja na koji se dovodi signal e . U slučaju objekta upravljanja koji ne unosi transportno kašnjenje, unutrašnji model poremećaja se svodi na polinom predviđanja $D(z^{-1})$ [3,4].

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

Svrha principa apsorpcije je da uključi model poremećaja u upravljačku strukturu u cilju potiskivanja uticaja poremećaja na stacionarnu vrednost upravljane promenljive. U Tsytkinovima radovima najčešće je korišćen sledeći polinom predviđanja

$$D(z^{-1}) = 2 - z^{-1} \quad (3)$$

koji se odnosi na klasu linearnih poremećaja, a njegova implementacija u IMPACT strukturi daje efikasne rezultate i za različite klase sporopromenljivih poremećaja. Manja perioda odabiranja u većoj meri opravdava linearnu aproksimaciju proizvoljnog signala na ograničenom vremenskom opsegu [1]. Prema standardnom postupku sinteze [3], za objekte minimalne faze, podrazumeva se da je

$$R(z^{-1}) = P_u^o(z^{-1}) \quad (4)$$

Spoljašnja kontura određuje dinamičko ponašanje nominalnog sistema i projektuje se na osnovu specificirane funkcije spregnutog prenosa sistema $G_{de}(z^{-1})$. Izborom željene funkcije diskretnog prenosa sistema $G_{de}(z^{-1})$ i rešavanjem jednačine [2,3]

$$G_{de}(z^{-1}) = \frac{z^{-1}P_r(z^{-1})}{Q^o(z^{-1}) + z^{-1}P_y(z^{-1})} \quad (5)$$

dolazi se do polinoma upravljačke strukture $P_y(z^{-1})$ i $P_r(z^{-1})$, čime je proces parametarske sinteze završen.

Zapazimo da strukturni blok dijagram na Sl. 3 obuhvata i slučaj kada se uzima u obzir i dinamika davača tipa apsolutnog enkodera ili rizolvera sa rizolver/digitalnim (R/D) konvertorom, kao i konačna dužina digitalne reči D/A konvertora. Međutim, usled konačne dužine digitalne reči R/D konvertora, digitalni meri signal pozicije i estimirani signal brzine poseduju šum kvantovanja [2]. Šum kvantovanja dovodi do fluktuacija upravljačke promenljive koje povećavaju gubitke u motoru i izazivaju treperenje izlazne promenljive, odnosno ugaone pozicije ili brzine motora. Zato je potiskivanje šuma kvantovanja nužna osobina upravljačke strukture elektromotornog pogona visokih performansi. Međutim, kako je to zapaženo u [1,2], unutrašnji model upravljačke strukture na Sl. 3 povećava osetljivost sistema na šum kvantovanja, posebno u slučaju brzinskog servomehanizma. Zato je u [1] data modifikacija strukture, koja uključuje opserver visokog kvaliteta radi estimacije signala povratne sprege, dok je u [1,2] predloženo generalno naprednije rešenje modifikacije strukture koje se odnosi na primenu prediktivnih filtara umesto unutrašnjeg modela poremećaja IMPACT strukture. U ovom radu biće pokazana implementacija jednostavnog polinomnog prediktora, koja omogućava jednostavno prepodešavanje strukture i direktan uticaj na robustne i filtarske performanse sistema.

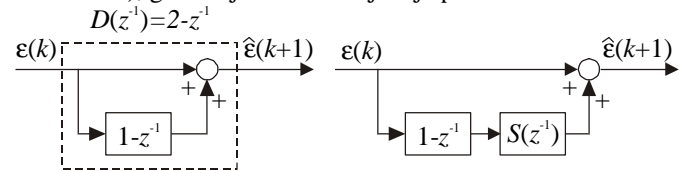
U opštem slučaju, prediktivan filtar se definiše kao algoritam koji estimira buduće vrednosti primarnog signala, dok istovremeno prigušuje komponente šuma [11]. U saglasnosti sa navedenom definicijom, može se primetiti da implementacija principa apsorpcije u IMPACT strukturi unosi predikciju signala generalisanog poremećaja, dok opšti unutrašnji model poremećaja, čija je sinteza zasnovana na rešavanju Diophantineove jednačine – što je razmatrano u [1], nije ništa drugo nego prediktivni filtar. Međutim, ovde će biti tretirane jednostavnije forme digitalnih prediktivnih filtara koje se od nedavno sreću u literaturi, čija sinteza teče znatno jednostavnije, i koji mogu biti tretirani kao modifikovani polinomi predviđanja za specijalan slučaj polinomnih modela signala. Neka je

$$e(k) = a_0 + a_1k + \dots + a_Mk^M = \sum_{i=0}^M a_i k^i \quad (6)$$

gde su koeficijenti polinoma a_i nepoznate realne konstante. Zajednička atraktivna osobina polinomnih prediktora je da njihova sinteza ne zavisi od tekućih polinomnih koeficijenata. Recimo, funkcija diskretnog prenosa Newtonovog prediktora, koji estimira signal tipa (6) sa horizontom predikcije od p odbiraka (tj. $\hat{e}(k+p)$), je oblika

$$H_M^p(z^{-1}) = \sum_{i=0}^M (1 - z^{-p})^i \quad (7)$$

Prediktivan filtar (7) procenjuje vrednost odbirka $\hat{e}(k+p)$ na osnovu $M+1$ prethodnih odbiraka signala $e(k)$, dok je za specijalan slučaj $M=1$ i $p=1$ identičan polinomu predviđanja (3). Uopšte, kada se radi o aplikacijama vezanim za elektromotorne pogone, zbog same prirode objekta upravljanja (kašnjenje koje objekat upravljanja unosi u sistem je minimalno), gotovo je uvek slučaj da je $p=1$.



Sl. 4. a) Newtonov prediktor ($M=1, p=1$) i b) LSN prediktor

LSN (Linear Smoothed Newton) prediktor [11], predstavlja poboljšanje klasičnog Newtonovog prediktora koje se sastoji u tome da se M -ta razlika ulaznog signala propušta kroz NF filtar $S(z^{-1})$. Ovakva modifikacija polinoma predviđanja je posebno privlačna za primenu zbog svoje jednostavnosti. Takođe, jednostavnosti radi, moguće je izabrati filtar sa jednim podešljivim parametrom i jasnim fizičkim značenjem

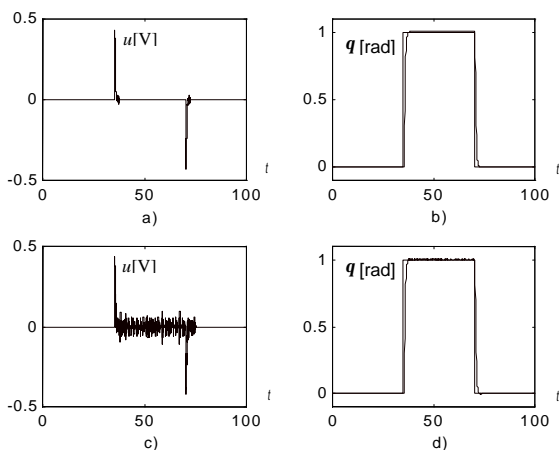
$$S(z^{-1}) = \frac{1}{T_f s + 1} \Big|_{s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} = \frac{T(1+z^{-1})}{2T_f + T + (T - 2T_f)z^{-1}} \quad (8)$$

Dakle, umesto polinoma predviđanja u sintezi IMPACT strukture brzinskog ili pozicionog servomehanizma predlože se upotreba jednostavnog LSN prediktora sa jednim podešljivim parametrom (T_f) koji ima jasno fizičko značenje. Povećanjem parametra T_f postižu se bolje filtarske osobine sistema i veća robustnost, pogotovu na području viših učestanosti. Jasno je da veće vrednosti T_f znače i sporiju dinamiku apsorpcije poremećaja, i suprotno. Međutim, može

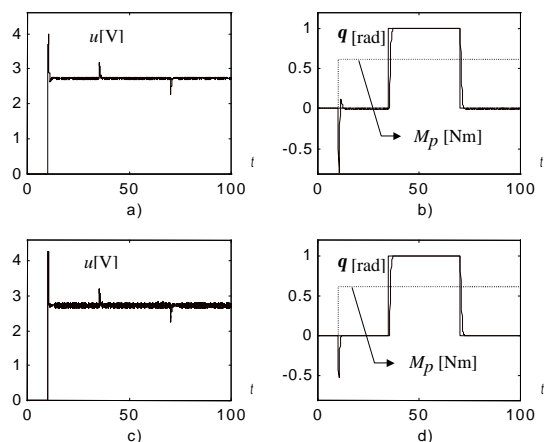
se naći kompromisno rešenje sa kojim je zadovoljen zahtev za željenom dinamikom sistema i u slučaju dejstva poremećaja, a istovremeno postignute i bolje robustne i filtarske performanse sistema [1,2]. Jedan podešljiv parametar kojim se sve to reguliše, daje predloženoj strukturi posebnu prednost.

IV. ILUSTRATIVNI PRIMER

Efikasnost primene LSN prediktora ($T_f=0.2s$) u odnosu na primenu polinoma predviđanja ($D(z^{-1}) = 2 - z^{-1}$), u slučaju IMPACT strukture pozicionog servomehanizma sa 16-bitnim D/A konvertorom i rizolverom sa 12-bitnim R/D konvertorom je ilustrovana na Sl. 5 i 6. Rezultati simulacije na Sl. 5 i Sl. 6, pod a) i b) se odnose na slučaj sa LSN prediktorem, a pod c) i d) sa polinomom predviđanja. Primenom LSN prediktivnog filtra potiskuje se šum kvantovanja (što je primetno u upravljačkom signalu), ali se pri tome neznatno narušava dinamika apsorpcije efekata poremećaja na izlaz sistema. Izabrana perioda odabiranja je $T=0.1s$. Objekat upravljanja je jednosmerni motor (U12M4T) upravljajući strujom u rotoru, sa pojačanjem $K = 4.38$ i vremenskom konstantom $T_m = 0.32s$, dok je željena funkcija spregnutog prenosa sistema specificirana tako da odskočni kontinualni odziv sistema bude bez greške u stacionarnom stanju i da ga karakteriše koeficijent relativnog prigušenja $z=1$ i neprigušena prirodna učestanost $\omega_n=2.5$ rad/s.



Sl. 5. Ilustracija rada IMPACT strukture kada nema dejstva poremećaja na sistem



Sl. 6. Ilustracija rada IMPACT strukture kada na sistem deluje odskočni poremećaj

V. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljene strukture sa opserverom poremećaja koje nude nekoliko atraktivnih osobina: sinteza spoljne i unutrašnje konture teče neinteraktivno kao kod IMPACT strukture, u odsustvu velikih parametarskih perturbacija dozvoljavaju nezavisno podešavanje dinamike otklanjanja poremećaja od dinamike odziva od strane zadate vrednosti, omogućavaju dobru robustnu performansu sistema, itd. Ipak, sve prednosti koje poseduje struktura sa opserverom poremećaja važe i za IMPACT strukturu. Dok s druge strane, prednosti IMPACT strukture se ogledaju u korišćenju unutrašnjeg modela poremećaja, transparentnom algoritmu sinteze koji nije ograničen specifičnostima objekta upravljanja [1], kao i u pogledu interne stabilnosti strukture. Unutrašnji model uključuje predikciju pri kompenzaciji poremećaja, što kod opservera poremećaja nije slučaj. Predstavljena modifikacija IMPACT strukture u ovom radu omogućava značajno poboljšanje strukture u smislu osetljivosti na šum kvantovanja, i podešavanja performansi sistema. S obzirom na tekuću popularnost struktura sa opserverom poremećaja i na prednosti IMPACT strukture, realno je u skoroj budućnosti očekivati da IMPACT struktura sve više dobija na primeni i značaju u sintezi servomehanizama visokih performansi.

REFERENCES

- [1] M.S. Matijević, "Razvoj novih struktura digitalno upravljanih elektromotornih pogona i industrijskih procesa", doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2001.
- [2] M.R. Stojić, M.S. Matijević "Primena prediktivnih filtara umesto unutrašnjeg modela poremećaja IMPACT strukture", Zbornik XLVI Konf. ETRAN-a, Teslić, 2002.
- [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. Tsypkin 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] A. Tesfaye, H.S. Lee, and M. Tomizuka, "A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control systems", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 5, №1, pp. 32-38, 2000.
- [6] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics", Trans. Jpn. Soc. Elect. Eng., vol. 107, № D, pp. 83-86, 1987.
- [7] T. Umeno and Y. Hori, "Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 38, №5, pp. 363-368, 1991.
- [8] C.J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 7, №5, pp. 513-526, 1999.
- [9] B. Yao, M. Al-Majed, and M. Tomizuka, "High-performance robust motion control of machine tools: an adaptive robust control approach and comparative experiments", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 2, №2, pp. 63-76, 1997.
- [10] B-K.Choi, C-H.Choi, and H.Lim, "Model-based disturbance attenuation for CNC machining centers in cutting process", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 4, №2, pp. 157-168, 1999.
- [11] S. Väliiviita, 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.

