

# Strukturalna sinteza sistema sa periodičnim poremećajima

MILAN S. MATIJEVIĆ, Mašinski fakultet u Kragujevcu

MILIĆ R. STOJIĆ, SLOBODAN VUKOSAVIĆ, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

**Rezime** – U radu su objašnjeni osnovni koncepti upravljanja koji podrazumevaju korišćenje specijalnih metoda za kompenzaciju periodičnih poremećaja poznatog perioda, i/ili praćenje periodičnih referentnih trajektorija bez greške u stacionarnom stanju. Sistematizovan je postupak sinteze konvencionalnih RCS sistema. Pored opisa konvencionalnih metoda sinteze zasnovanih na principu unutrašnjeg modela poremećaja (IMP – Internal Model Principle), predložena je upotreba manje opšteg ali efikasnijeg modela poremećaja periodičnih signala. U razmatranje je uzeta i IMPACT struktura (Internal Model Principle and Control Together) u specijalnom slučaju njene primene – nad objektom bez čistog kašnjenja i prisustvu poremećaja periodičnog karaktera. Pokazane su prednosti koncepta upravljanja zasnovanog na IMPACT strukturi i to pre svega u pogledu fleksibilnih mogućnosti njene primene za efikasno potiskivanje efekata poremećaja i projektovanje robustne performanse sistema. Predloženi koncept RCS sistema zasnovanih na IMPACT strukturi je ilustrovan u sintezi brzinskog servomehanizma sa jednosmernim motorom u ulozi izvršnog orgna i prisustvu periodičnog momenta opterećenja.

**Ključne reči:** IMPACT struktura, RCS sistemi, Periodični poremećaji

## 1. UVOD

Termin “Repetitive Control Systems (RCS)” se odnosi na posebnu klasu sistema čiji upravljački algoritmi imaju sposobnost kompenzacije periodičnih poremećaja poznatog perioda, ili praćenja periodičnih referentnih trajektorija bez greške u stacionarnom stanju [1,2]. Takvi poremećaji se javljaju u mnogim inženjerskim primenama. Na primer, u sistemima za memorisanje podataka, ekscentriteti putanja na disku generišu periodično promenljivu željenu trajektoriju i zahtevaju periodično kretanje glave za čitanje i upis podataka na frekvenciji rotacije diska da bi se održalo perfektno praćenje. Kod elektromotornih pogona javljaju se poremećajni momenti periodičnog karaktera na frekvenciji rotacije motora. Neuravnoteženost koja se javlja kod rotacionih mašina prouzrokuje periodične momentne poremećaje na frekvenciji rotacije obrtnih delova. Frekvencija izvora energije je takođe u korelaciji sa pojavom periodičnih poremećaja. Periodični poremećaji proizvoljne forme se javljaju u mnogim sistemima upravljanja mašinskim procesima obrade i montaže delova, kod industrijskih robota, NC mašina, u automatizovanom glodanju, kod rotacionih mašina kao što su strugovi i štamparske mašine [1].

Mnoge metode za kompenzaciju periodičnih poremećaja su razvijene i za kontinualne i za digitalne sisteme upravljanja [1-5]. Neke metode su projektovane specijalno za sinusne poremećaje i lako se mogu proširiti na kompenzaciju multipla sinusnih poremećaja, te su

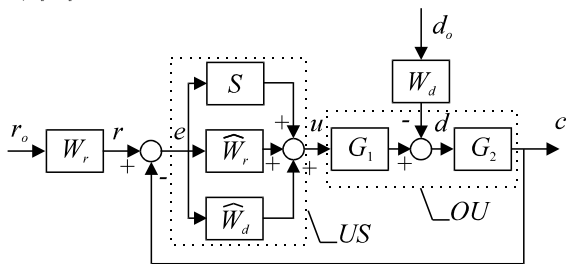
prema tome primenljive na generalan periodičan slučaj. Niskopropusne karakteristike fizičkih sistema, s druge strane, znače da generalno samo nekoliko harmonika periodičnih signala poremećaja je potrebno razmatrati. Prema [2] postoje dva glavna prilaza potiskivanja sinusnog poremećaja. Jedan prilaz je adaptivno prenosno upravljanje (AFC-Adaptive Feedforward Control), koji se sastoji u tome da se sinusni poremećaj potiskuje dovođenjem dodatnog inverznog sinusnog signala na ulaz objekta, pri čemu se amplituda i faza poremećaja estimiraju adaptivno. Drugi prilaz je zasnovan na principu unutrašnjeg modela (IMP), odnosno principu apsorpcije.

U ovom radu je objašnjen koncept konvencionalnih RCS sistema zasnovanih na principu apsorpcije, ili principu unutrašnjeg modela (IMP). Predložen je i testiran novi model prostoperiodičnih poremećaja čijim uvođenjem u upravljačku strukturu se postiže eliminisanje efekata poremećaja na izlaz sistema sa znatno kraćim trajanjem prelaznog procesa. Posebna pažnja je posvećena IMPACT strukturi u sintezi digitalno upravljano elektromotornog pogona i prisustvu poremećaja periodičnog karaktera. Za izveden oblik IMPACT strukture, simulacijom su ilustrovane mogućnosti strukture u pomenutim uslovima njene primene. Pokazano je da se primenom predloženog rešenja mogu ostvariti bolje performanse sistema nego do sada.

## 2. PRINCIP APSORPCIJE I PRINCIP UNUTRAŠNJEG MODELA (IMP)

U slučaju da poremećaj može biti modeliran funkcijom koja je rešenje homogene diferencijalne ili diferencne jednačine poznatog reda, moguće je na jasan i jednostavan način izvršiti modifikaciju strukture kontrolera tako da greška stacionarnog stanja sistema bude u potpunosti otklonjena. Pomenuta homogena diferencijalna, odnosno, diferencna jednačina predstavlja unutrašnji model, a sam postupak modifikacije kontrolera u navedenom smislu podrazumeva korišćenje principa unutrašnjeg modela.

Tipična struktura koja proističe iz upotrebe principa unutrašnjeg modela je data na slici 1 [1]. Kompenzator  $S$  unutar upravljačke strukture služi za stabilizaciju sistema i obezbeđivanje drugih željenih performansi, dok unutrašnji modeli ( $\hat{W}_r \equiv W_r; \hat{W}_d \equiv W_d$ ) unutar upravljačke strukture obezbeđuju željeni kvalitet stacionarnog stanja. Signali  $r_o$  i  $d_o$  mogu biti Diracovi impulsi, poremećaji tipa početnih uslova ili beli šum. Podrazumeva se da je informacija o referentnom signalu i poremećaju dovoljno poznata tako da funkcije prenosa generatora signala  $r$  i  $d$  ( $\hat{W}_r \equiv W_r; \hat{W}_d \equiv W_d$ ) mogu biti određene.



Sl.1. Struktura sistema sa unutrašnjim modelom

Princip unutrašnjeg modela (IMP) je nastao kao važan doprinos u sintezi servosistema [6], i to puno kasnije nego što je Kulebakin svojim radovima zasnovao teoriju selektivne invarijantnosti [7, 8]. Bitan rezultat koji je nastao iz ovih razmatranja jeste princip selektivne invarijantnosti ili princip apsorpcije.

Suštinske razlike između principa apsorpcije i principa unutrašnjeg modela (IMP) ne postoje, a njihova primena obezbeđuje rešenje regulacionog problema bez mnogo algebarskih detalja. Svrha korišćenja principa apsorpcije je otklanjanje uticaja determinističkih poremećaja, odnosno bitno potiskivanje uticaja stohastičkih poremećaja na upravljanu promenljivu u stacionarnom stanju. Prema principu apsorpcije, model poremećaja mora biti sadržan u algoritmu upravljanja. Princip apsorpcije se sastoji u projektovanju unutar sistema upravljanja apsorpcionog filtra na čiji ulaz se dovodi signal poremećaja.

Razmotrimo postupak sinteze apsorpcionog filtra, odnosno, polinoma apsorpcije u slučaju kompenzacije efekata poremećaja  $f(t)$  kod digitalnih sistema. Pretpostavimo da je poremećaj čije efekte treba

kompenzovati regularan, tj. da  $k$ -ti odbirak poremećaja može biti predstavljen konačnim brojem prethodnih  $m_o$  odbiraka. U tom slučaju važi relacija

$$f(kT) = D(z^{-1})f((k-1)T) \quad (1)$$

gde je  $D(z^{-1})$  polinom predviđanja stepena  $m_o-1$ . Relacija (1) se zove jednačina ekstrapolacije ili predviđanja [9]. Kao uslov apsorpcije poremećaja zadate klase, sada se može postaviti jednačina kompenzacije

$$\Phi(z^{-1})F(z^{-1}) = 0, \quad t = kT \geq (\deg \Phi)T \quad (2)$$

gde je

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

polinom kompenzacije ili apsorpcioni filter, a  $F(z^{-1})$  kompleksni lik poremećaja. Pri dovoljno potpunoj apriornoj informaciji o poremećaju, polinom predviđanja  $D(z^{-1})$  se određuje jednostavno, polazeći od modela poremećaja u vremenskom domenu. Međutim, u složenijim slučajevima nije jednostavno doći do pogodnog modela poremećaja, što otežava sintezu apsorpcionog filtra. Zato je u [1] pokazan eksplicitan postupak određivanja polinoma apsorpcije koji za krajnji rezultat ima sledeću relaciju

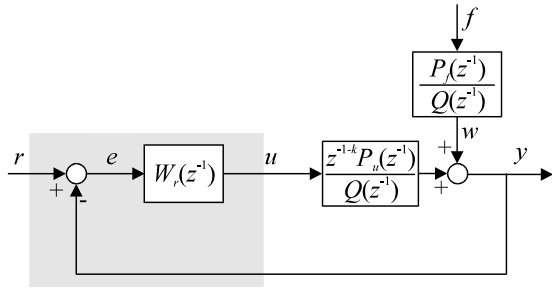
$$\Phi(z^{-1}) = F_{den}(z^{-1}), \quad F(z^{-1}) = \frac{F_{num}(z^{-1})}{F_{den}(z^{-1})} \quad (4)$$

Pri nedovoljnom nivou apriornih informacija o poremećajima koristi se adaptivan prilaz, koji omogućava da se i u uslovima neodređenosti dobije ocena klasa poremećaja koji deluju na sistem [10]. I u slučaju stohastičkih poremećaja, moguća je sinteza adekvatnog apsorpcionog filtra. Recimo, stohastički poremećaj koji je nastao dvostrukom integracijom belog šuma će biti apsorbovan filtrom  $\Phi(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2$ , koji se koristi i u slučaju nagibnog, odnosno linearnog poremećaja.

## 3. KONVENCIONALNI RCS SISTEMI

Specijalan slučaj sistema zasnovanih na principu apsorpcije jesu RCS sistemi. Ili, sa druge strane posmatrano, neke strukture sistema sa periodičnim poremećajima (RCS) mogu biti tumačene kao specijalni slučajevi sistema sa unutrašnjim modelom poremećaja. Praktična primena principa apsorpcije se sastoji u tome da se unutar upravljačke strukture implementira adekvatan apsorpcioni filter radi kompenzacije specificirane klase poremećaja. U slučaju RCS sistema, bitne pretpostavke su da je period poremećaja poznat i da ne varira tokom vremena. Uspešna primena principa apsorpcije poremećaja zavisi od kvaliteta (tj. tačnosti) korišćenog modela poremećaja i načina implementacije apsorpcionog filtra u strukturi SAU. Generalno, način implementacije apsorpcionog filtra jeste problem strukturne sinteze sistema i opšte preporuke u ovom smislu za sada nisu definisane. Uobičajen pristup korišćenja unutrašnjeg modela poremećaja u direktnoj grani SAU povlači za

sobom kompromis između stabilnosti i tačnosti praćenja [1].



Sl. 2. Digitalan sistem upravljanja

U slučaju diskretnog sistema upravljanja sa Sl.2,  $W_r(z^{-1})$  je funkcija diskretnog prenosa koja opisuje upravljačku strukturu sistema;  $Q(z^{-1})$ ,  $P_u(z^{-1})$  i  $P_f(z^{-1})$  - polinomi po kompleksnoj promenljivoj  $z^{-1}$  ( $Q(0) = P_f(0) = 1$ ,  $P_u(0) \neq 0$ ), koji opisuju objekat upravljanja;  $r$  i  $f$  - referentni signal i signal poremećaja, respektivno. Saglasno principu apsorpcije, funkcija prenosa upravljačkog dela strukture je

$$W_r(z^{-1}) = \frac{S(z^{-1})}{B_1(z^{-1})\Phi(z^{-1})} \quad (5)$$

te se sintezom adekvatnog polinoma kompenzacije  $\Phi_r(z^{-1})$  obezbeđuje nulta greška stacionarnog stanja sistema. U slučaju da se dinamika promene referentnog signala i poremećaja bitno razlikuju, treba posebno projektovati adekvatne polinome  $\Phi_r(z^{-1})$  i  $\Phi_f(z^{-1})$  za apsorpciju greške praćenja usled dejstva referentnog signala i poremećaja, respektivno; te je

$$B(z^{-1}) = B_1(z^{-1})\Phi(z^{-1}) = B_1(z^{-1})\Phi_r(z^{-1})\Phi_f(z^{-1}) \quad (6)$$

Za poremećaje periodičnog karaktera važi

$$\Phi(z^{-1}) = 1 - z^{-N} \quad (7)$$

gde je  $N$  broj perioda odabiranja koji je sadržan u periodu periodičnog signala. Čest je slučaj da su nule polinoma  $\Phi$  na jediničnom krugu (za odskočni signal -  $\Phi(z^{-1}) = 1 - z^{-1}$ , nagibni -  $\Phi(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2$ , itd.). Otuda se posebno vodi računa da su polinomi  $S$  i  $\Phi$  međusobno prosti, jer bi u suprotnom zajedničke nule ovih polinoma postale polovi sistema sa zatvorenom povratnom spregom (što bi ugrozilo uslov asimptotske stabilnosti sistema). Polinomi  $S(z^{-1})$  i  $B_1(z^{-1})$  se dobijaju kao rešenja Diophantineove jednačine

$$Q(z^{-1})\Phi(z^{-1})B_1(z^{-1}) + z^{-l-k}P_u(z^{-1})S(z^{-1}) = K_{de}(z^{-1}) \quad (8)$$

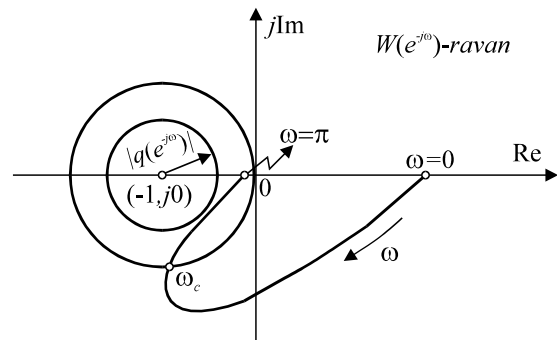
gde je  $K_{de}(z^{-1})$  željeni karakteristični polinom sistema. Postupak sinteze treba da omogući asimptotsku regulaciju ili praćenje sa adekvatnim karakteristikama sistema u pogledu stabilnosti i kvaliteta prelaznog procesa. Treba imati u vidu da se za velike vrednosti  $N$  (videti 7) rešavanje jednačine (8) usložnjava, i da može rezultovati polinomom  $S$  jako visokog reda. Dok implementacija apsorpcionog filtra  $\Phi(z^{-1}) = 1 - z^{-N}$  u kontroleru nije sporna,

visok red polinoma  $S$  može biti problematičan za rad kontrolera u realnom vremenu. Drugo, već je pomenuto da unutrašnji model,  $1 - z^{-N}$ , ima svih  $N$  karakterističnih korenova na jediničnom krugu, koji predstavlja granicu stabilnosti za diskretne sisteme. Takva osobina utiče na visoku osetljivost sistema na nemodeliranu dinamiku. Problem stabilizacije i proširenja oblasti robustne stabilnosti RCS sistema se rešava modifikacijom unutrašnjeg modela, tako da se karakteristični korenovi, posebno na visokim frekvencijama pomeraju unutar jediničnog kruga.

$$\Phi(z^{-1}) = 1 - q(z^{-1})z^{-N}, \quad |q(e^{-j\omega})| \leq 1, \quad \forall \omega \geq 0 \quad (9)$$

Posle izvršene modifikacije (9), kompenzacije zahtevane klase poremećaja se može izvršiti samo približno. Tako nastaje protivurečnost između tačne kompenzacije periodičnog poremećaja i robustne performanse sistema. Ovide su moguće različite vrste kompromisa. Projektovanje adekvatnog NF filtra  $q(z^{-1})$  je krucijalno pitanje kada se govori o sintezi ovog tipa sistema sa unutrašnjim modelom. Postupak određivanja stabilizacionog filtra  $q$  obuhvata sledeće korake:

- 1) Crtanje Nyquistove krive,
- 2) Nalaženje frekvencije  $\omega_c / T$  na kojoj Nyquistova kriva prvi put dodiruje, odnosno, preseca jediničnu kružnicu sa centrom u tački  $(-1, j0)$ ,
- 3) Bira se odgovarajuća frekvencijska propustnost filtra  $q$ , manja od  $\omega_c / T$ ,
- 4) Bira se red filtra  $q$ , tako da se postigne dovoljna selektivnost filtra koja omogućava sistemu zadovoljavajuću rezervu stabilnosti.



Sl. 3. Nyquistova kriva RCS sistema sa unutrašnjim modelom

Izložena procedura sinteze je u osnovi ista i u slučaju kada parametri modela objekta nisu sasvim poznati već variraju oko svojih nominalnih vrednosti. U takvim situacijama se može prihvatiti da parametri modela leže u poznatim intervalima; a umesto Nyquistove krive, u gore izloženom algoritmu sinteze, koristi se anvelopa familije Nyquistovih krivih za definisani intervalni objekat upravljanja.

Ovde ćemo predložiti, koristeći ideju iz [11], i mogućnost sinteze polinoma apsorpcije (tipa (7)) za

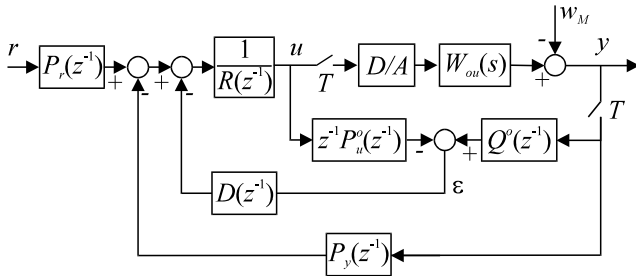
specijalan slučaj periodičnih signala koji su parne ili neparne funkcije vremena

$$\Phi(z^{-1}) = 1 - z^{-N} \quad (10)$$

Predloženi filter (10) ima dvostruko kraće trajanje prelaznog procesa u odnosu na konvencionalni apsorpcioni filter (7).

#### 4. IMPACT STRUKTURA U ULOZI RCS SISTEMA

Na slici 4 je prikazan specijalan slučaj Tsytkinove IMPACT strukture kada objekat upravljanja ne sadrži transportno kašnjenje, i koji može biti primenjen u slučaju digitalno upravljanih elektromotornih pogona [1]. 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.



Sl. 4. IMPACT struktura digitalnog sistema upravljanja

Upravljački deo strukture na slici 4 je dat u funkciji polinoma po kompleksnoj promenljivoj  $z^{-1}$ . Objekat upravljanja  $W_{ou}(s)$  može biti predstavljen svojim nominalnim diskretnim modelom

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

koji je eksplicitno implementiran u strukturi kao nominalni dvoulazni unutrašnji model objekta upravljanja. Signal  $\epsilon$  estimira uticaj generalisanog poremećaja na upravljanu promenljivu, odnosno uticaj spoljašnjeg poremećaja i neodređenosti nominalnog modela objekta. Nepreciznosti modeliranja mogu biti adekvatno opisane multiplikativnom granicom neodređenosti  $\alpha(\omega)$

$$W(z^{-1}) = W^o(z^{-1})(1 + \delta W(z^{-1})) \quad (11)$$

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

Tada, sistem na slici 4 ispunjava uslov robustne stabilnosti ako je nominalni sistem stabilan i ispunjena relacija

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

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. Unutrašnja kontura se sastoji iz unutrašnjeg modela poremećaja i dvoulaznog modela objekta upravljanja, koji je određen polinomima  $z^{-1}P_u^o(z^{-1})$  i  $Q^o(z^{-1})$ . U slučaju objekta upravljanja koji ne unosi transportno kašnjenje, unutrašnji model poremećaja se svodi na polinom predviđanja  $D(z^{-1})$ , čijim izborom se ima uticaj na robustnu performansu sistema i apsorpciju željene klase poremećaja. Recimo, za slučaj poremećaja odskočnog karaktera ima se da je  $D(z^{-1})=1$ , dok se  $D(z^{-1})=2-z^{-1}$  odnosi na klasu linearnih poremećaja, itd. U slučaju periodičnog poremećaja perioda  $NT$ , gde je  $T$  perioda odabiranja digitalnog sistema, polinom predviđanja je

$$D(z^{-1}) = z^{-(N-1)} \quad (12)$$

dok, u slučaju superpozicije poremećaja čiji su polinomi predviđanja  $D_1$  i  $D_2$  rezultujući polinom predviđanja je oblika

$$D(z^{-1}) = D_1(z^{-1}) + D_2(z^{-1}) - z^{-1}D_1(z^{-1})D_2(z^{-1}) \quad (13)$$

Prema standardnom postupku sinteze, za objekte minimalne faze, podrazumeva se da je

$$R(z^{-1}) = P_u^o(z^{-1}) \quad (14)$$

Elementi spoljne konture strukture  $P_r(z^{-1})$  i  $P_y(z^{-1})$  određuju dinamičko ponašanje sistema sa zatvorenom povratnom spregom, i njihova sinteza teče nezavisno od unutrašnje konture. Željeni spektar polova sistema može biti specificiran na osnovu zadatog koeficijenta relativnog prigušenja  $\zeta$  i neprigušene prirodne učestanosti  $\omega_n$ . Pri tom, uzimajući u obzir nultu grešku stacionarnog stanja za odskočni signal na ulazu, željena funkcija spregnutog prenosa je oblika

$$G_{de}(z^{-1}) = \frac{(1 - (z_1 + z_2) + z_1 z_2) z^{-2}}{1 - (z_1 + z_2) z^{-1} + z_1 z_2 z^{-2}}$$

gde je

$$z_{1/2} = e^{s_{1/2} T}, \quad s_{1/2} = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (15)$$

a u slučaju asinhronog motora u ulozu izvršnog organa ( $Q^o(z^{-1})=1-z^{-1}$ ), polinomi  $P_r(z^{-1})$  i  $P_y(z^{-1})$  se računaju saglasno željenoj funkciji spregnutog prenosa

$$P_r(z^{-1}) = (1 - (z_1 + z_2) + z_1 z_2) z^{-1} \quad (16)$$

$$P_y(z^{-1}) = 1 - (z_1 + z_2) + z_1 z_2 z^{-1}$$

čime je proces parametarske sinteze završen. Treba imati u vidu da izbor polinoma koeficijenta relativnog prigušenja  $\zeta$  i neprigušene prirodne učestanosti  $\omega_n$  utiče na dinamička svojstva sistema sa jedne strane, ali i na robustnost i filterne osobine sistema sa druge strane. Pitanja modifikacije strukture u slučaju prisustva mernog šuma ovde neće biti razmatrana. Zadržaćemo se samo na pogodnostima IMPACT strukture čiji je polinom predviđanja nezavistan deo strukture i čija sinteza teče

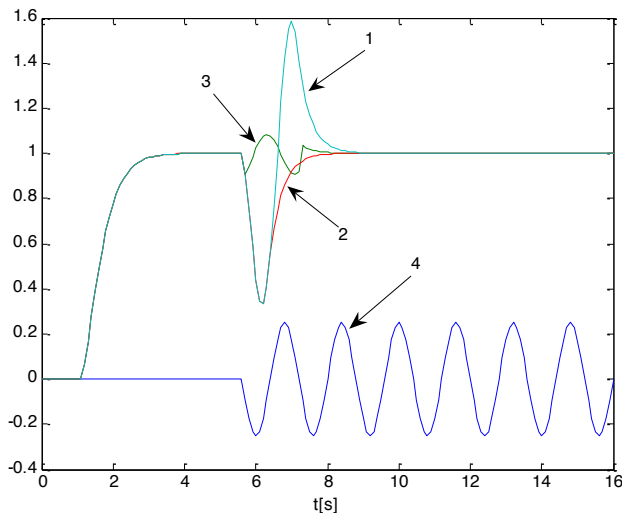
jednostavno u skladu sa potrebama RCS sistema koji su predmet ovog razmatranja.

## 5. ILUSTRATIVNI PRIMER

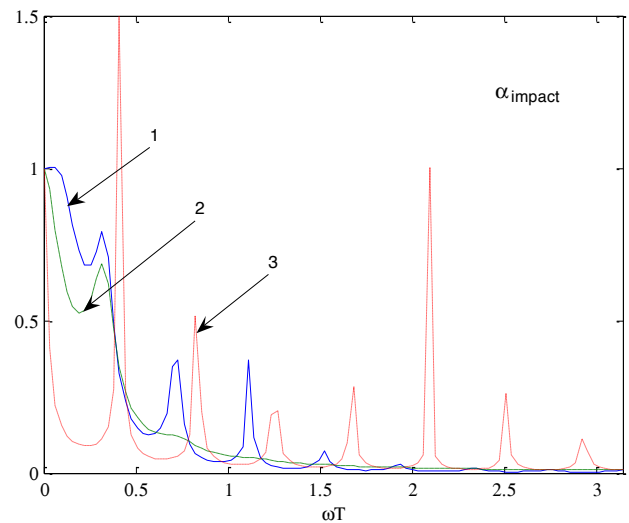
Efekti primene opisanih struktura su testirani u slučaju sinteze digitalno upravljanih brzinskog servomehanizma sa jednosmernim motorom u ulozi izvršnog organa. Za objekat upravljanja je usvojen robotski motor U12M4T sa  $K=4.38$  i  $T_m=0.32s$  ( $W_{ou}(s)=K/(T_ms+1)$ ). Željena performansa sistema je definisana potrebom apsorpcije periodičnog poremećaja ( $w(t)=0.25\sin(3.927t)h(t-5.6)$ ), stepenom relativnog priguše-nja  $\zeta=1$ , i neprigušenom prirodnom učestanošću  $\omega_n=3$  rad/s, odnosno, zadatom funkcijom spregnutog diskretnog prenosa

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

Izabrana je perioda odabiranja  $T=0.1s$ , te je  $N=16$  (videti (7), (10), i (12)). U skladu sa unutrašnjim modelima poremećaja (7), (10) i (12), i željenom funkcijom prenosa, definisani su polinomi upravljačkih struktura tipičnog RCS sistema sa unutrašnjim modelom poremećaja (7) i (10), i IMPACT strukture. Rezultati simulacije pokazuju da IMPACT struktura može da ostvari bolje robustne i dinamičke performanse, pogotovu ako se polinom apsorpcije, koji se inače nezavisno implementira u strukturu, proširi tako da obuhvati i slučaj poremećaja šireg karaktera. Efikasnost korišćenja predloženog filtra (10) je takođe ilustrovan rezultatima simulacije (Sl. 5.). Slučaj 3) na Sl.4, se poklapa sa slučajem RCS sistema sa  $\Phi(z^{-1}) = (1 - z^{-N})$  (pod 1), Sl3.)



Sl.5. Odziv sistema na  $r(t)=h(t-1):1$  RCS ( $\Phi=1-z^{-N}$ ) 2) RCS sa  $\Phi(z)=1+z^{-N/2}$ ; i 3) IMPACT ( $\Phi=(1-z^{-N})(1-z^{-1})^2$ )



Sl.6. Amplitudno frekvencijske karakteristike komplementarne funkcije osetljivosti IMPACT strukture ( $N=16$ ):1)  $\Phi=(1-z^{-N})(1-z^{-1})^2$  2)  $\Phi=(1-z^{-N})(1-z^{-1})$  3)  $\Phi=(1-z^{-N})$ .

## 6. ZAKLJUČAK

Primena IMPACT strukture u sintezi RCS sistema pokazuje prednosti u odnosu na do sada korišćene strukture zasnovane na principu apsorpcije poremećaja. U slučaju IMPACT strukture nije nužno praviti kompromise između robustne performanse sistema i kompenzacije poremećaja. Negativan uticaj periodičnih signala može biti apsorbovan u potpunosti. Takođe, nominalni karakteristični polinom IMPACT strukture ne zavisi od unutrašnjeg modela poremećaja, te su njenom primenom izbegnute teškoće vezane za rešavanje Diophantineove jednačine (8) pri sintezi RCS sistema sa unutrašnjim modelom.

## LITERATURA

- [1] M.S. Matijević, "Razvoj novih struktura digitalno upravljanih elektromotornih pogona i industrijskih procesa", doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2001.
- [2] W. Messner and M. Bodson, "Design of adaptive feedforward algorithms using internal model equivalence", *Int. J. Control*, vol. 9, pp. 199-21, 1995.
- [3] M. Tomizuka, "On the desing of digital tracking controllers", *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 115, N°2, pp. 412-418, 1993.
- [4] Ya.Z. Tsyppkin, "New classes of discrete-time repetitive control systems" (in Russian), *Avtom.Telemech.*, N°12, pp. 76-92, 1994.
- [5] K.K. Chew and M. Tomizuka, "Digital control of repetitive errors in disk drive systems", *IEEE Control Magazine*, vol. 10, N° 1, pp. 16-20, 1990.
- [6] B.A. Francis and W.M. Wonham, "The internal model principle for linear multivariable regulators", *Appl. Math. Opt.*, vol. 2, N°3, pp. 170-194, 1975.

- [7] V.S. Kulebakin, "Behavior of continuous linear control systems subjected to external disturbances", (in Russian), Dokl. AN USSR, vol. 68, N° 5, pp. 73-79, 1949.
- [8] V.S. Kulebakin, "Application of operator K(D) in the function description and their practical application" (in Russian), Tp. VVIA o.b. Zhukovski, v. 659, p.59, 1958.
- [9] Ya.Z. Tsypkin, "Adaptive invariant discrete-time control systems" (in Russian), *Avtom. Telemekh.*, N°5, pp.96-121, 1991
- [10] M. R. Stojić, M. S. Matijević, "Disturbance invariant speed controlled servo drive with Tesla's induction motor", *Proc. International IEEE Conference TELSIS 2001*, Niš, September 19-21, 2001
- [11] S.N. Vukosavić and M.R. Stojić, "Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed servo drive", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, N°1, pp. 108-117, 1998.

## SUMMARY

### STRUCTURAL SYNTHESIS OF REPETITIVE CONTROL SYSTEM

*One of the main tasks of control system is to track the reference signal, in the presence of external disturbances, without steady-state error. This paper describes different controlling structures that using the principle of absorption suppress known periodical repetitive disturbances. The conventional method based upon the application of IMP (Internal Model Principle) is first described and then the more efficient IMPACT (Internal Model Principle and Control Together) controlling structure is proposed, which completely rejects effects of any periodical disturbance on the steady-state value of controlled variable (system output). Besides the efficient extraction of periodical disturbances, the IMPACT structure enables achievement the higher degree of system robustness. The structure design is illustrated by the extraction of periodical load torque disturbance in a speed-controlled electrical drive with DC motor.*

**Key words:** IMPACT structure, RCS systems, Repetitive disturbances