

# Sistemi upravljanja sa unutrašnjim modelima: Pregled

MILAN S. MATIJEVIĆ, Mašinski fakultet u Kragujevcu

MILIĆ R. STOJIC, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Pregledni rad

**Rezime** – U istoriji teorije automatskog upravljanja, za sada, postoje tri globalna prilaza sinteze sistema, koja za ključnu reč imaju “unutrašnji model”. Razvoj različitih koncepata primene unutrašnjih modela u upravljačkoj strukturi sistema bio je motivisan i različitim namerama u funkciji kojih su unutrašnji modeli korišćeni. Ranih sedamdesetih, grupa autora, rešavajući probleme regulacije i praćenja kod multivarijabilnih sistema, formuliše princip unutrašnjeg modela (Internal Model Principle - IMP). Korišćenje ovog principa podrazumeva uključivanje unutrašnjeg modela poremećaja u upravljačku strukturu sistema, čime se postiže minimalan efekat poremećaja na izlaz sistema. Osamdesetih godina razvija se novi koncept upravljanja sa unutrašnjim modelom, koji eksplicitno uključuje matematički model objekta u upravljačku strukturu sistema, a inače je poznat pod nazivom Internal Model Control (IMC). Ustanovljeni postupak sinteze IMC strukture je izveden na bazi prethodnih koncepata koji su u prethodne tri decenije bazirani na sličnim idejama. Između ostalog, svrha korišćenja unutrašnjeg modela kod IMC strukture je i estimacija signala efekata dejstva poremećaja na izlaz sistema. Treći, Tsypkinov koncept IMPACT (Internal Model Principle and Control Together) strukture sistema sa unutrašnjim modelom, iako se razvijao nezavisno od ustanovljenih ideja sistema sa unutrašnjim modelom, objedinjuje prednosti prethodnih koncepata i unosi u upravljačku strukturu sistema i unutrašnji model poremećaja i unutrašnji model objekta upravljanja. Strukture sa unutrašnjim modelom su pokazale veliku robustnost i sposobnost otklanjanja efekata različitih determinističkih klasa poremećaja. U ovom radu dat je presek stanja u oblasti upravljačkih struktura sa unutrašnjim modelom. Posebno su analizirane glavne ideje i procedure koje su doprinele razvoju ovog koncepta upravljanja. Ovim radom nisu obuhvaćeni multivarijabilni sistemi sa unutrašnjim modelom. Međutim, bitni zaključci i izložene procedure lako mogu biti prošireni i na multivarijabilne sisteme.

**Ključne reči:** Unutrašnji model, IMPACT struktura, IMC struktura, Princip unutrašnjeg modela - IMP

## 1. UVOD

Ideja sinteze sistema sa unutrašnjim modelom je relativno stara. Prvi radovi iz ove oblasti se pojavljuju ranih sedamdesetih godina, iako su generalno svi postupci analitičkog projektovanja sistema bazirani na poznavanju modela objekta i apriornih informacija o karakteru poremećaja [1-2]. U osnovi, koncept unutrašnjih modela podrazumeva unošenje u upravljačku strukturu sistema modela poremećaja i/ili eksplicitno unošenje modela objekta upravljanja. Korišćenjem unutrašnjih modela moguće je, eksplicitno i generalnije nego što je do sada bio slučaj, osvojiti postupak sinteze upravljačke strukture sistema u smislu kompenzacije određene klase poremećaja, zatim postizanja velikog stepena robustnosti sistema, itd. Korišćenje unutrašnjih modela može biti tumačeno i kao poseban vid parametrizacije upravljačke strukture sistema u cilju postizanja jednostavnijeg postupka sinteze, estimacije nemejljivih signala, on-line adaptacije kao i

kombinovanja prednosti već proverenih algoritama upravljanja.

Mnoge strukture mogu biti tumačene kao strukture sa unutrašnjim modelom. Ipak, publikovani radovi u ovoj oblasti su uglavnom bazirani na jednom od sledećih prilaza

- Internal Model Principle (IMP) podrazumeva uključivanje modela poremećaja u upravljačku strukturu, što je motivisano namerom da se eliminiše efekat poremećaja na izlaz sistema.
- Internal Model Control (IMC) podrazumeva da je unutar upravljačke strukture eksplicitno uključen model objekta upravljanja (u paraleli sa realnim objektom). Na ovakvoj parametrizaciji mogu biti zasnovani mnogi upravljački algoritmi, mada, struktura poznata pod ovim nazivom ima utemeljen postupak sinteze i njena najbitnija osobina jeste da je pogodna za projektovanje robustne stabilnosti.



regulaciji linearnih, stacionarnih, kontinualnih i digitalnih sistema sa koncentrisanim parametrima je dobro razumljiva. Štaviše, egzistencija unutrašnjih modela je pokazana i za druge klase sistema: u [21-25] za klasu nelinearnih sistema, pri rešavanju problema robustne regulacije i robustnog asimptotskog praćenja; u [26] unutrašnji modeli su korišćeni pri rešavanju nerobustnog problema asimptotskog praćenja u digitalnim linearnim nestacionarnim sistemima. I robustni i nerobustni upravljački problemi su razmatrani u literaturi unutrašnjih modela sa naglaskom na robustan slučaj. U ranijem slučaju, unutrašnji model je bio osobina kontrolera, dok je kasnije razmatran kao osobina kaskadne veze kontrolera i objekta.

Prema [14], koncept unutrašnjih modela je veoma opšt i obuhvata široku klasu kibernetičkih situacija. Naprimjer, u sistemima za predviđanje interakcije čovek-mašina [27], takođe se koristi koncept unutrašnjih modela. Intuitivna ideja da postoji potreba za stvaranjem unutrašnjeg modela spoljnog sveta koji deluje na objekat, nije samo prisutna u literaturi koja se odnosi na oblast automatskog upravljanja, već je koncept unutrašnjih modela primenljiv i u drugim oblastima kao što su: epistemologija [28], neurologija [29], psihologija [30], veštačka inteligencija [31] i opšta teorija sistema [32].

### 3. TEORIJA SELEKTIVNE INVARIJANTNOSTI I FORMULACIJA PRINCIPA APSORPCIJE

Problemu invarijantnosti [35], odnosno problemu kompenzacije uticaja spoljašnjih poremećaja, kako u kontinualnim, tako i u digitalnim sistemima upravljanja, posvećen je veliki broj radova [34, 35].

Uslovi apsolutne ili potpune invarijantnosti, koji obezbeđuju tačnu kompenzaciju proizvoljnih poremećaja, nisu fizički ostvarljivi. To je zbog nemogućnosti implementacije beskonačno velikog koeficijenta pojačanja u konturi povratne sprege kod kontinualnih sistema [36], odnosno, zbog nemogućnosti otklanjanja kašnjenja objekta upravljanja kod digitalnih sistema [33]. Međutim, rešavajući razne zadatke elektromehanike i automatike, X. Θ. Θ ρ ϕ ε α<sup>-</sup> i η λ [37, 38] je dokazao egzistenciju uslova invarijantnosti koji obezbeđuju kompenzaciju poznate klase poremećaja kod kontinualnih sistema, i na taj način zasnovao teoriju selektivne invarijantnosti. Bitan rezultat koji je proistekao iz ovih razmatranja jeste princip selektivne invarijantnosti ili princip apsorpcije.

Postojanje apriorne informacije o poremećajima, a samim tim i poznavanje modela poremećaja, omogućilo je sintezu sistema sposobnih da apsorbuju, odnosno da kompenzuju širu klasu poremećaja. Takvi sistemi upravljanja dobili su naziv selektivno invarijantni, a njihova sinteza se zasnivala na principu selektivne invarijantnosti [37, 38], odnosno na sintezi polinoma kompenzacije za određenu klasu kontinualnih signala.

Klasa kontinualnih signala je bila određena tipom poremećaja čije se dejstvo na sistem očekivalo, a polinom kompenzacije je predstavljao analogni filter modeliran linearnom kombinacijom diferencijatora proizvoljnog reda sa osobinom da njegova reakcija na ulazna dejstva iz specificirane klase signala bude jednaka nuli u stacionarnom stanju. Na primer, periodičnoj klasi poremećaja učestanosti  $\omega$  ( $f(t) = A \sin \omega t$ ) odgovara polinom kompenzacije  $K(D) = D^2 + \omega^2$ , gde je  $D$  operator diferenciranja ( $D = d/dt$ ) tako da važi  $K(D)f(t) \equiv 0$  [34]. Teoreme o mogućnostima predstavljanja široke klase kontinualnih funkcija u vidu rešenja homogenih diferencijalnih jednačina je definisao Shannon [39] proučavajući osobine diferencijalnih analizatora. Ovi rezultati [39], u potpunosti definišu određivanje polinoma kompenzacije. Znatno kasnije, predstavljanje spoljašnjeg poremećaja homogenim diferencijalnim jednačinama ili njihovim rešenjima u vidu linearne kombinacije poznatih baznih funkcija, je opet primenjeno za kompenzaciju spoljašnjih poremećaja u sistemima upravljanja [40-43]. Te diferencijalne jednačine su zapravo odgovarale unutrašnjim modelima spoljašnjih poremećaja. Praktično, polinomi kompenzacije su kasnije korišćeni u mnogim radovima za sintezu sistema upravljanja sa unutrašnjim modelom i modelom poremećaja [42-44]. Polinomi kompenzacije za diskretne funkcije su se razmatrali u [45, 46].

Princip apsorpcije se sastoji u projektovanju unutar sistema upravljanja apsorpcionog filtra na čiji ulaz se dovodi signal poremećaja [47]. Razmotrićemo postupak sinteze apsorpcionog filtra, odnosno polinoma apsorpcije u slučaju kompenzacije efekata poremećaja  $f(t)$  kod digitalnih sistema. Pretpostavićemo 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

$$f(kT) = D(q)f((k-1)T) \quad (1)$$

gde je  $q$  operator pomaka unazad, a  $D(q)$  polinom predviđanja u operatorskoj formi stepena  $m_o - 1$ . Relacija (1) zove se jednačina ekstrapolacije ili predviđanja [33]. Kao uslov apsorpcije poremećaja zadate klase, sada se može postaviti jednačina kompenzacije [48]

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

gde je

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

polinom kompenzacije ili apsorpcioni filter, a  $F(z)$  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 [49] pokazan eksplicitan postupak određivanja polinoma apsorpcije koji za krajnji rezultat ima sledeću relaciju

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

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, i to iskoristi za njihovu kompenzaciju. Tada je polinom predviđanja  $D(z^{-1})$  poznat samo do koeficijenta, a možda i stepena, i koeficijenti polinoma se utvrđuju identifikacionim postupkom na osnovu posmatranja samog poremećaja [50]. Takvi sistemi su nazvani adaptivno invarijantni sistemi [33].

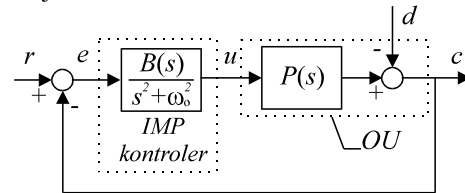
Princip apsorpcije je po svom sadržaju identičan principu unutrašnjeg modela (IMP) i svrha mu je da uključi model poremećaja u upravljačku strukturu [48].

#### 4. PERIODIČNI SISTEMI UPRAVLJANJA

Periodično upravljanje (Repetitive control) je termin koji se odnosi na korišćenje specijalnih metoda za kompenzaciju periodičnih poremećaja ili za praćenje periodičnih referentnih trajektorija poznatog perioda bez greške stacionarnog stanja [51]. Takvi poremećaji se javljaju u mnogim inženjerskim primenama. U sistemima za memorisanje podataka, ekscentriteti putanja na disku predstavljaju periodično promenljivu željenu trajektoriju i zahtevaju periodično kretanje glave za čitanje i upis podataka na frekvenciji rotacije diska da bi se održalo perfektno praćenje [51]. U elektromotornim pogonima 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.

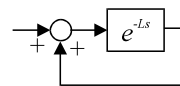
Mnoge metode za kompenzaciju periodičnih poremećaja su razvijene i za kontinualne i za digitalne sisteme upravljanja [51-59]. Neke metode su projektovane specijalno za sinusne poremećaje i lako se mogu proširiti na kompenzaciju multipla sinusnih poremećaja, te su prema tome primenljive na generalan periodičan slučaj. Niskopropusne karakteristike fizičkih sistema, s druge strane, znače da generalno samo nekoliko harmonika periodičnih signala poremećaja je potrebno razmatrati. Prema [51] 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 i ilustrovan je na Sl. 2.

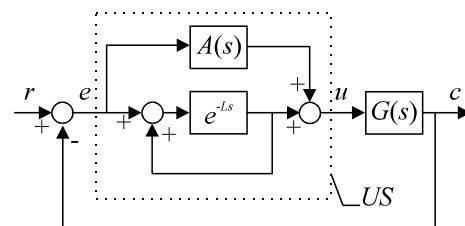


Sl. 2. Periodični sistem upravljanja kojim se postiže otklanjanje sinusnog poremećaja učestanosti  $\omega$

Dakle, neke strukture periodičnih sistema upravljanja mogu biti tumačene kao specijalan slučaj sistema sa unutrašnjim modelom [56-59]. U [56] su predloženi i izučeni kontinualni periodični sistemi upravljanja zasnovani na principu apsorpcije. Generator periodičnih signala (Sl. 3.) je zapravo unutrašnji model periodičnog poremećaja fiksnog perioda  $L$  i proizvoljne forme koji se uvodi u konturu upravljanja, kako je to pokazano na Sl. 4. Bitne pretpostavke su da je period poremećaja poznat i da ne varira tokom vremena.



Sl. 3. Generator periodičnog poremećaja



Sl. 4. Periodični sistem upravljanja

Međutim, ovakav način sinteze kontinualnih periodičnih sistema ne može biti tačno realizovan zbog strukturne nestabilnosti sistema. Za stabilizaciju sistema se predlaže da se u generator periodičnih signala uvede specijalan filter, što dovodi do netačne kompenzacije periodičnih poremećaja. Takav prilaz, u suštini se koristi i pri projektovanju digitalnih periodičnih sistema [52, 57, 58]. U [57], u direktnoj grani periodičnog digitalnog sistema sa povratnom spregom predložen je kontroler oblika

$$G_{rf}(z^{-1}) = \frac{R(z^{-1})}{A_d(z^{-1})S(z^{-1})}$$

gde je  $A_d(z^{-1})$  polinom apsorpcije periodičnog poremećaja ili unutrašnji model kako je to u [57] navedeno.

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

gde je  $N$  broj perioda odabiranja koji odgovara periodu proizvoljnog periodičnog poremećaja. Radi strukturne stabilizacije sistema predložena je modifikacija unutrašnjeg modela

$$A_d(z^{-1}) = 1 - q(z, z^{-1})z^{-N}$$

gde je

$$q(z, z^{-1}) = \alpha_m z^m + \alpha_{m-1} z^{m-1} + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_m z^{-m}$$

$$\alpha_i > 0, \quad 2\alpha_m + 2\alpha_{m-1} + \dots + 2\alpha_1 + \alpha_0 = 1$$

niskofrekventni filter koji nema uticaja na faznu karakteristiku sistema. U ovom slučaju unutrašnji model samo približno odgovara unutrašnjem modelu poremećaja. Otuda je prisutna protivurečnost između tačne kompenzacije periodičnog poremećaja i stabilnosti. Ipak, postoje uspešne primene ovakvog algoritma upravljanja [57, 60]. Štaviše, u [60] je razmatrana i mogućnost fluktuacija perioda poremećaja. Ovaj problem je premošćen implementacijom podešljive periode odabiranja tako da  $N$  ostaje fiksno.

U digitalnim periodičnim sistemima se relativno lako odstranjuju teškoće koje su principijelne za kontinualne periodične sisteme [59]. U [59] je razmatrana strukturna sinteza digitalnih periodičnih sistema upravljanja zasnovanih na principu apsorpcije, koji treba da obezbede kompenzaciju uticaja spoljašnjih periodičnih poremećaja poznatog konstantnog perioda i proizvoljne forme. Korišćenje IMPACT strukture u specijalnom slučaju sinteze periodičnih sistema upravljanja ( $\Phi(z^{-1}) = 1 - z^{-N}$ ) doprinelo je da zahtevi za tačnom kompenzacijom poremećaja i stabilnošću sistema nisu više međusobno oprečni. Predložena struktura omogućava sintezu periodičnih sistema upravljanja koji uključuju i nestabilne dinamičke objekte. Ova klasa periodičnih digitalnih sistema sa unutrašnjim modelom poseduje očiglednu prednost i može imati širu oblast primene.

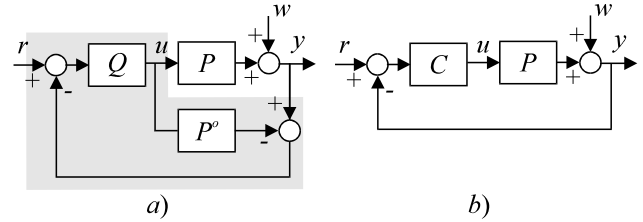
## 5. IMC STRUKTURA

IMC struktura je predstavljena strukturnim blok dijagramom na Sl. 5 a) [61, 62]. Upravljački deo strukture, koji može biti implementiran kroz upravljački softver ili analogni hardver, osenčen je na slici i uključuje IMC kontroler ( $Q$ ) i nominalni model upravljanog procesa ( $P^o$ ). Blok  $P$  predstavlja realni objekat upravljanja. Pošto upravljački deo strukture eksplicitno sadrži model objekta upravljanja, to je struktura dobila naziv *Internal Model Control* (IMC) [61]. IMC struktura za stabilne objekte upravljanja može biti tumačena kao specijalan slučaj Youla - parametrizacije svih klasičnih kontrolera ( $C$ ) koji obezbeđuju stabilnost sistema sa zatvorenim povratnom spregom [63,64]. Parametrizacija pojednostavljuje postupak sinteze i nalaženja kontrolera  $C$  (Sl. 5 b)) koji „automatski” doprinosi stabilnosti sistema sa zatvorenim povratnom spregom. Strukture prikazane na Sl. 5. a) i b) su međusobno ekvivalentne, tj. imaju identične performanse ukoliko je ispunjena relacija

$$Q = \frac{C}{1 + P^o C}$$

odnosno

$$C = \frac{Q}{1 - P^o Q}$$



Sl. 5. a) IMC struktura b) Ekvivalentna klasična struktura sistema sa povratnom spregom

Prednosti IMC strukture najbolje možemo sagledati ako pretpostavimo da model perfektno reprezentuje proces ( $P^o \equiv P$ ). Onda je signal povratne sprege jednak signalu uticaja poremećaja na izlaz procesa ( $w$ ), a relacije između ulaza ( $r$ ) i izlaza ( $y$ ) su afine

$$y = PQ(r - w) + w$$

$$e = r - y = (1 - PQ)(r - w)$$

što pojednostavljuje postupak sinteze [65]. S druge strane, iste funkcije prenosa su nelinearne funkcije po  $C$  (Sl. 5 b)), dok su afine funkcije po  $Q$  (Sl. 5 a)). Kada ne postoji dejstvo poremećaja na sistem ( $w=0$ ), sistem (Sl. 5 a)) je efektivno u otvorenom, bez povratne sprege. Sistem je stabilan ako i samo ako su i IMC kontroler ( $Q$ ) i objekat upravljanja ( $P$ ) stabilni. Istovremeno, ako je objekat stabilan, potreban i dovoljan uslov unutrašnje stabilnosti jeste stabilnost IMC kontrolera [61]. Pokazuje se da je za stabilan proces povratna sprega potrebna samo radi kompenzacije poremećaja. Podešavanje IMC kontrolera je direktno vezano za željenu dinamiku procesnog izlaza i otklanjanja efekata poremećaja, bez bojazni da će biti narušena stabilnost sistema. S druge strane, i kada je  $C$  jednostavan PID kontroler, obično nije očigledno kako se promenom podešljivih parametara može uticati na željenu performansu sistema i za koje vrednosti parametara sistem ostaje stabilan [65]. Očigledno je da IMC kontroler igra ulogu feedforward kontrolera, čija je sinteza mnogo jednostavnija nego sinteza klasičnog kontrolera povratne sprege [65]. IMC struktura pruža i mogućnost implementacije nelinearnosti (bez negativnih implikacija po stabilnost sistema), bilo unutar objekta upravljanja i njegovog modela, bilo kroz kompleksne nelinearne algoritme upravljanja, tj. IMC kontroler.

U prethodnom izlaganju posebno treba imati u vidu učinjenu pretpostavku da je ponašanje procesa bilo u potpunosti opisano modelom ( $P^o \equiv P$ ). Međutim, neće biti nikada takvih slučajeva u realnom životu. Neizbežno, postojaće razlike između nominalnog modela i realnog procesa, što zovemo greškom modeliranja ili perturbacijom koju ne znamo. Greške modeliranja mogu nastati iz različitih razloga kao što su linearizacija (modela), različiti radni uslovi sredine, zanemarivanje brze dinamike procesa, varijacije fizičkih parametara unutar procesa, itd. Dinamičko ponašanje procesa je vremenski promenljivo i sve te promene nisu sadržane u nomina-

Inom modelu procesa ( $P^o$ ). Otuda, posle obezbeđivanja odgovarajuće dinamike sistema i otklanjanja efekata poremećaja, dodaje se zahtev za robustnom stabilnošću [61]. Naime, razmatra se mogućnost da se pomoću fiksne upravljačke strukture upravlja širim skupom objekata upravljanja. Na primer, skup diskretnih objekata upravljanja može biti predstavljen relacijom

$$\wp = \left\{ P: \left| \frac{P(z^{-1}) - P^o(z^{-1})}{P^o(z^{-1})} \right|_{z^{-1}=e^{-j\omega}} \leq \alpha(\omega), \omega \in [0, \pi] \right\}$$

gde frekvencijska funkcija  $\alpha(\omega)$  definiše granicu neodređenosti diskretnog modela, a  $P^o(z^{-1})$  je nominalni diskretni model objekta upravljanja. Kao sasvim pouzdanu, možemo prihvatiti sledeću prezentaciju modela objekta upravljanja

$$P(z^{-1}) = P^o(z^{-1})(1 + \delta P(z^{-1})) \quad (5)$$

pri čemu je nominalni model poznat, a perturbacija ograničena ( $|\delta P(e^{-j\omega})| \leq \alpha(\omega), \omega \in [0, \pi]$ ). Zahtev za robustnom stabilnošću podrazumeva da sistem ostaje stabilan za sve  $P \in \wp$  [61, 48]. U cilju definisanja uslova robustne stabilnosti na primeru klasičnog sistema sa povratnom spregom (Sl. 5 b)) uvodimo amplitudno frekvencijsku karakteristiku inverzne komplementarne funkcije osetljivosti [48]

$$\alpha_c(\omega) = \left| \frac{1 + C(z^{-1})P^o(z^{-1})}{C(z^{-1})P^o(z^{-1})} \right|_{z^{-1}=e^{-j\omega}} \quad (6)$$

Pretpostavimo da  $P$  i  $P^o$  imaju isti broj nestabilnih polova. Onda je potreban i dovoljan uslov robustne stabilnosti sistema sadržan u relaciji [59]

$$\alpha(\omega) < \alpha_c(\omega) \quad \omega \in [0, \pi] \quad (7)$$

Sinteza IMC strukture je razvijena kao robustni upravljački metod za hemijske inženjerske aplikacije [61]. S obzirom da je većina hemijskih inženjerskih procesa stabilna, to su i razvoji ove strukture bili usredsređeni na stabilne objekte upravljanja [65]. Otuda, navedeni kriterijum robustne stabilnosti svojim pretpostavkama nije ograničio praktične primene. S druge strane, u literaturi su poznati i mnogi drugi, sveobuhvatiji kriterijumi robustne stabilnosti i robustne performanse [66 - 70]. Sem robustne stabilnosti, nužno je postići i unutrašnju stabilnost sistema što je korišćenjem IMC strukture direktno ostvarljivo. Zato se IMC struktura češće koristi u postupku sinteze nego implementacije. Sinteza IMC strukture se u načelu sastoji iz dva koraka [61]: 1) projektuje se kontroler  $\hat{Q}$  da bi se postigla željena performansa sistema ne uzimajući pri tom u obzir moguća ograničenja upravljačke promenljive, niti moguću neodređenost parametara objekta. U ovom koraku se obično koristi  $H^2/H^\infty$  optimizaciona procedura. 2) IMC kontroler  $\hat{Q}$  se proširuje niskofrekvencijskim filtrom ( $Q = \hat{Q}F_{LP}$ ), odnosno propusni opseg sistema se smanjuje sve više i više, dok uslov robustne stabilnosti ne bude

zadovoljen. Implementirani filter smanjuje amplitudu upravljačke promenljive i sprečava ulazak u zasićenje. Projektovanjem robustne stabilnosti sistema i "razdešavanjem" kontrolera  $\hat{Q}$ , postupak sinteze IMC kontrolera je završen. Struktura je veoma podesna za projektovanje robustne stabilnosti, ali nije pogodna za apsorpciju proizvoljne klase spoljašnjih poremećaja [1]. Sintezu strukture prikazane na Sl. 5 a) razmotrićemo detaljnije u slučaju sinteze digitalnog sistema upravljanja, koristeći pri tome polinomni prilaz [1,48]. Radi otklanjanja greške

$$E(z^{-1}) = \frac{1 - P^o(z^{-1})Q(z^{-1})}{1 + Q(z^{-1})(P(z^{-1}) - P^o(z^{-1}))} (R(z^{-1}) - W(z^{-1}))$$

koristićemo princip apsorpcije, pretpostavljajući istu dinamiku promene zadate vrednosti i poremećaja. Saglasno principu apsorpcije (2), polinom apsorpcije  $\Phi(z^{-1})$ , koji se projektuje za adekvatnu klasu poremećaja ( $r-w$ ), mora biti faktor izraza  $1 - P^o(z^{-1})Q(z^{-1})$ . U slučaju digitalnih sistema, sinteza IMC kontrolera teče u tri koraka tako da je

$$Q(z^{-1}) = \hat{Q}(z^{-1})Q_{db}(z^{-1})F_{LP}(z^{-1})$$

Prvi korak obuhvata inverziju objekta, i na taj način projektovanje optimalnog dinamičkog ponašanja sistema. Nominalni diskretni model objekta upravljanja se faktorizuje na sledeći način:  $P^o(z^{-1}) = P_A(z^{-1})P_M(z^{-1})$ . Faktor  $P_A(z^{-1})$  obuhvata neminimalno fazne nule i čisto kašnjenje objekta, dok se faktor  $P_M(z^{-1})$  odnosi na deo objekta koji je minimalne faze i prema tome invertibilan. Rezultat prvog koraka sinteze je  $\hat{Q}(z^{-1}) = (1/P_M(z^{-1}))Q_w(z^{-1})$ , gde se  $Q_w(z^{-1})$  bira, saglasno principu apsorpcije, tako da polinom apsorpcije  $\Phi(z^{-1})$  bude faktor izraza  $1 - P^o(z^{-1})\hat{Q}(z^{-1})$ .

Drugi korak predstavlja modifikaciju rezultata dobijenog u prethodnom koraku i ima za cilj da učini željeni dead-beat odziv sistema mogućim. Funkcija prenosa  $Q_{db}(z^{-1})$  se bira da poništi sve polove u  $\hat{Q}(z^{-1})$  koji imaju negativne realne delove u  $z$  ravni, čime se sprečavaju nagli skokovi i izrazito treperenje upravljačke promenljive. Istovremeno,  $Q_{db}(z^{-1})$  treba da zadovolji ispunjenje principa apsorpcije, odnosno, polinom apsorpcije  $\Phi(z^{-1})$  treba da bude faktor izraza  $1 - P^o(z^{-1})\hat{Q}(z^{-1})Q_{db}(z^{-1})$ . Kako je

$$1 - P^o(z^{-1})\hat{Q}(z^{-1})Q_{db}(z^{-1}) =$$

$$(1 - P^o(z^{-1})\hat{Q}(z^{-1}))Q_{db}(z^{-1}) + (1 - Q_{db}(z^{-1}))$$

i kako je  $\Phi(z^{-1})$  već faktor izraza  $1 - P^o(z^{-1})\hat{Q}(z^{-1})$ , to je dovoljno zahtevati da  $\Phi(z^{-1})$  bude faktor izraza  $1 - Q_{db}(z^{-1})$ .

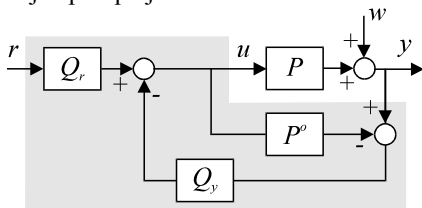
Treći korak podrazumeva uvođenje takvog nisko-frekvencijskog filtra  $F_{LP}(z^{-1})$  da uslov robustne

stabilnosti (7) bude zadovoljen. U slučaju IMC strukture izraz (6) je oblika

$$\alpha_{IMC}(\omega) = \frac{1}{|P^o(e^{-j\omega})Q(e^{-j\omega})|} = \frac{1}{|Q_w(e^{-j\omega})Q_{db}(e^{-j\omega})F_{LP}(e^{-j\omega})|}$$

Izabrani filter ne sme da narušava uslov apsorpcije, tako da polinom apsorpcije  $\Phi(z^{-1})$  mora biti faktor izraza  $1 - P^o(z^{-1})\hat{Q}(z^{-1})Q_{db}(z^{-1})F_{LP}(z^{-1})$ , to jest, dovoljno je zahtevati da  $\Phi(z^{-1})$  bude faktor izraza  $1 - F_{LP}(z^{-1})$ . Međutim, način kako izabrati  $F_{LP}(z^{-1})$  u skladu sa principom apsorpcije a da istovremeno bude zadovoljen i uslov robustne stabilnosti, u opštem slučaju nije poznat [48]. Jednostavni slučajevi su proučeni u [61], gde su predložene i formule za određivanje  $F_{LP}(z^{-1})$  u slučaju otklanjanja poremećaja tipa odskočne ili nagibne funkcije. Primenom ovih formula dolazi se do filtera veoma visokog reda [48]. S druge strane, u predloženim formulama za projektovanje niskofrekvencijskog filtra se ostvaruje uticaj na ponašanje sistema sa veoma malim brojem podesivih parametara koji imaju direktno fizičko značenje [61]. U izvornoj literaturi, u kojoj je utemeljen postupak sinteze IMC kontrolera [61], princip apsorpcije nije eksplicitno korišćen, kao ni polinomni pristup sinteze.

Ukoliko se zahteva praćenje ulaza ( $r$ ) i otklanjanje efekata poremećaja ( $w$ ) na procesni izlaz, pri čemu su dinamičke karakteristike zadatog ulaza i poremećaja bitno različite, to je povoljno koristiti IMC strukturu prikazanu na Sl. 6 [61]. Blokovi upravljačke strukture  $Q_r$  i  $Q_y$  mogu se nezavisno projektovati, pri čemu se blok  $Q_y$  projektuje za otklanjanje efekata poremećaja, a blok  $Q_r$  za praćenje ulaza sa zadatom dinamikom. Struktura sa dva stepena slobode, odnosno sa dva nezavisna pri projektovanju upravljačka bloka, obezbeđuje odvojeno projektovanje apsorpcije za  $r$  i  $w$ .

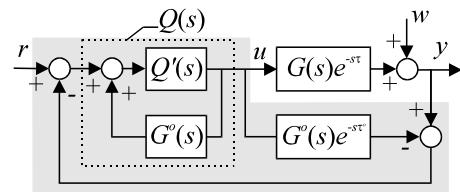


Sl. 6. IMC struktura sa dva stepena slobode

Za nestabilne objekte upravljanja IMC struktura nije pogodna za implementaciju zbog uslova unutrašnje stabilnosti [61]. Međutim, u ovom slučaju IMC parametrizacija može biti korišćena za projektovanje klasičnog kontrolera sistema sa povratnom spregom (Sl. 5 b)). Korišćenje IMC strukture u slučaju nestabilnih objekata upravljanja je detaljno razmatrano u [61].

Odličan istorijski pregled nastanka strukture prikazane na Sl. 5 a), koja ima svoju specifičnu karakteristiku modela u paraleli sa objektom dat je u [65, 71]. Ispostavlja se da je do otkrića došlo nekoliko ljudi istovremeno u kasnim pedesetim. Newton, Gould i Kaiser

[72] su koristili strukturu da transformišu sistem sa zatvorenim povratnom spregom u sistem sa otvorenim, tako da rezultati Wiener-a mogu biti primenjeni za pronalaženje  $H^2$  optimalnog kontrolera  $Q$ . Istovremeno, Smith [73] je predložio strukturu (Sl. 7) pogodnu za podešavanje konture regulacije sa objektom upravljanja koji poseduje transportno kašnjenje. Ideja se sastoji u sintezi ekvivalentne strukture u kojoj se transportno kašnjenje efektivno uklanja iz konture regulacije, tako da se regulator zatim može projektovati kao da kašnjenje ne postoji [74,75]. Dakle, pogodna parametrizacija kontrolera, koja takođe sadrži model procesa u paraleli sa objektom, se koristi u cilju pojednostavljenja postupka sinteze. Međutim, kontura sa Smithovim prediktorom je osetljiva na varijacije parametara procesa, kao i na dejstva spoljnih poremećaja [75, 76]. Zato su mnogi istraživači kasnije modifikovali ovu strukturu, te su u novije vreme neke modifikacije bazirane upravo na IMC strukturi [76].



Sl. 7. Alternativna prezentacija strukture sa Smithovim prediktorom

Nezavisno od Smithovog prediktora, Zirwas [77] i Giloi [78] predložili su prediktivnu strukturu za upravljanje sistemima sa vremenskim kašnjenjem. Horowitz [79] je uveo sličnu strukturu i nazvao je "model feedback". Ipak, prva potpuna realizacija strukture na Sl. 5 a) se pripisuje Franku [71]. On je na bazi rada svojih prethodnika predložio strukturu sa unutrašnjim modelom uzimajući u obzir promenu referentnog ulaza i dejstvo poremećaja na rad sistema. Bitne doprinose razvoju strukture dali su: Youla i saradnici [63,64], koji su proširili konvencionalnu "Q-parametrizaciju" kontrolera (C) na upravljanje nestabilnim objektima; Zames [80], koji definiše  $H^\infty$  upravljački problem; i Doyle [81,82], koji uvodi strukturne singularne vrednosti što će biti značajno za projektovanje robustne stabilnosti u multivarijabilnom slučaju. Nezavisno od ovih razvoja, došlo je do pojave i drugih upravljačkih algoritama u kojima je direktno, eksplicitno i odvojeno sadržan model upravljanog procesa [65]. Dinamički model objekta je ovde korišćen da predvidi efekte budućih dejstava na upravljane veličine. Buduće promene upravljanih veličina su određene optimizacijom sa ciljem minimiziranja predviđene greške zavisno od radnih ograničenja. Optimizacija se ponavlja u svakoj periodi odabiranja i zasnovana je na ažuriranim informacijama merenja na objektu upravljanja. Ovaj koncept upravljanja je dao prve primene dinamičke optimizacije sa velikom skalom koje su rutinirano primenjene u realnom vremenu u procesnoj industriji. S obzirom da su ovi koncepti upravljanja u upravljačkom





između kompenzacije sistema i njegove strukturne stabilnosti [59]), što omogućava estimaciju generalisanog poremećaja, njegovu predikciju i prenosnu (feedforward) kompenzaciju. Unutrašnji model uključuje dvoulazni unutrašnji nominalni model objekta upravljanja i unutrašnji model generalisanog poremećaja. Polinomi  $A$  i  $C$  određuju unutrašnji model spoljašnjih poremećaja. Tačnije, unutrašnji model poremećaja je definisan polinomom  $A$  koji direktno zavisi od polinoma apsorpcije  $\Phi$ , dok je  $C$  proizvoljan stabilan polinom. Kao i u slučaju IMC strukture, unutrašnji model objekta upravljanja se može tumačiti kao estimator uticaja poremećaja na procesni izlaz ( $w$ ), odnosno kao estimator generalisanog poremećaja koji uključuje kako uticaj i spoljašnjih poremećaja ( $w$ ) tako i uticaj perturbacija parametara objekta upravljanja na izlaz sistema. Dakle, označena promnljiva  $\varepsilon$  na Sl. 8 predstavlja procenu generalisanog poremećaja, odnosno rezultujućeg uticaja spoljašnjih i parametarskih poremećaja na izlaz sistema. Za razliku od IMC strukture, gde se koristi jednoulazni ili dinamički unutrašnji model objekta upravljanja, ovde se preporučuje korišćenje dvoulaznog ili statičkog modela koji ima konačnu impulsnu karakteristiku. U [59] je pokazano da dvoulazni unutrašnji model pruža mogućnost primene i za slučaj nestabilnih objekata upravljanja i da prema tome ima prednost nad jednoulaznim unutrašnjim modelom. Sem toga, implementacija dvoulaznog unutrašnjeg nominalnog modela objekta je znatno jednostavnija [33]. Za razliku od standardne IMC strukture čija se sinteza ostvaruje postupnom procedurom modifikacija funkcije prenosa kontrolera, postupak sinteze IMPACT strukture je direktan i omogućava projektovanje apsorpcije šire klase poremećaja [48]. IMPACT struktura poseduje dve konture koje se sasvim nezavisno projektuju. Projektovanje unutrašnje konture je zasnovano na rešavanju polinomnog identiteta

$$z^{-1-k} A(z^{-1}) + B_1(z^{-1})\Phi(z^{-1}) \equiv C(z^{-1}) \quad (8)$$

uz uvažavanje pretpostavke [1, 2]

$$R(z^{-1}) = \begin{cases} P_u^o(z^{-1}), & \text{kada je OU minimalne faze} \\ \hat{P}_u^o(z^{-1}), & \text{kada je OU neminimalne faze} \end{cases} \quad (9)$$

Zapravo, polinomi  $A(z^{-1})$  i  $B_1(z^{-1})$  su rešenje Diophantineove jednačine (8), dok izbor stabilnog polinoma  $C(z^{-1})$  može biti proizvoljan. Polinom  $A(z^{-1})$  predstavlja implicitni model poremećaja, dok izbor stabilnog polinoma  $C(z^{-1})$  ima uticaja na dinamiku apsorpcije i na filtarska svojstva sistema. Dobre filtarske sposobnosti unutrašnjeg modela i bolji doprinos robustnoj performansi sistema, s jedne strane, i efikasna dinamika apsorpcije poremećaja, s druge strane, jesu međusobno oprečni zahtevi [1, 2]. Zato se u cilju sprečavanja osetljivosti na merni šum i boljih robustnih osobina sistema u opsegu viših učestanosti, preporučuje da

adekvatan NF filter bude sastavni deo unutrašnjeg modela poremećaja

$$\frac{A(z^{-1})}{C(z^{-1})} = \frac{A_f(z^{-1})A_1(z^{-1})}{C(z^{-1})}$$

gde je  $A_f(z^{-1})/C(z^{-1})$  NF digitalni filter koji se bira, a polinom  $A_1(z^{-1})$  sledi iz uslova apsorpcije poremećaja (8), i može biti tumačen kao implicitni model poremećaja. Na niskim frekvencijama dinamika unutrašnje konture može biti u potpunosti opisana nominalnim modelom objekta upravljanja. Na višim frekvencijama greške modeliranja mogu doći do izražaja, ali tada robustna performansa sistema može biti održana kako je to pokazano u [1]. Unutrašnja kontura kompenzuje uticaj generalisanog poremećaja i podiže nivo robustne performanse sistema. Otuda, spoljašnja kontura "vidi" unutrašnju kao nominalni objekat upravljanja, određuje dinamičko ponašanje nominalnog sistema i projektuje se na osnovu specificirane funkcije spregnutog prenosa sistema

$$G_{de}(z^{-1}) = \frac{z^{-1-k} H_{de}(z^{-1})}{K_{de}(z^{-1})}$$

Pri tome, željena frekvencijska propustnost mora biti usklađena sa frekvencijskom propustnošću upravljanog procesa radi dobijanja prihvatljive dinamike promene upravljačkog signala i postizanja adekvatne robustne performanse sistema. Takođe, treba imati u vidu i druga moguća ograničenja, koja je poželjno imati u vidu radi dobrih robustnih osobina sistema [1]. Iz uslova da funkcija spregnutog prenosa nominalnog sistema odgovara željenoj funkciji prenosa dobija se Diophantineova jednačina

$$Q^o(z^{-1}) + z^{-1-k} P_y(z^{-1}) \equiv T(z^{-1})K_{de}(z^{-1}) \quad (10)$$

čija rešenja su polinom  $P_y(z^{-1})$  i polinom  $T(z^{-1})$  (koji mora biti stabilan, a u slučaju da je  $k=0$  imamo da je  $T(z^{-1}) \equiv 1$ ); i dobija se izraz za izračunavanje polinoma  $P_r(z^{-1})$

$$P_r(z^{-1}) \equiv T(z^{-1})H_{de}(z^{-1}) \quad (11)$$

Na kraju, nužno je proveriti da li definisana upravljačka struktura ispunjava uslov robustne stabilnosti. Recimo, za stabilne objekte upravljanja, uslov robustne stabilnosti za IMPACT strukturu je

$$\alpha(\omega) < \left| \frac{C(z^{-1})(Q^o(z^{-1})R^o(z^{-1}) + z^{-1-k} P_u^o(z^{-1})P_y^o(z^{-1}))}{z^{-1-k} P_u^o(z^{-1})(P_y^o(z^{-1})C(z^{-1}) + Q^o(z^{-1})A(z^{-1}))} \right|_{z^{-1} = e^{-j\omega}}$$

za  $\omega \in [0, \pi/T]$ . Ukoliko ovaj uslov nije ispunjen, kako je to objašnjeno u [1], modifikuje se željena funkcija prenosa, bira se drugi polinom  $C(z^{-1})$ , ili se izborom odgovarajućih faktora pravi adekvatniji izbor rešenja Diophantineove jednačine (10).

U osnovi, sinteza IMPACT strukture se sastoji u rešavanju dve Diophantineove jednačine (8) i (10), čija rešenja garantuju apsorpciju specificirane klase generalisanog poremećaja i željeno dinamičko ponašanje sistema. Prema predloženom algoritmu, sinteza dvaju kontura teče potpuno nezavisno, tj. Diophantineove jednačine (8) i (10) nisu u međusobnoj interakciji, što je svakako prednost, a što je ostvareno izborom polinoma (8). Međutim, na taj način su umanjene mogućnosti strukture u smislu projektovanja robustne stabilnosti. Ukoliko je primaran cilj projektovanje robustne stabilnosti sistema, redosled koraka se menja i prvo teče sinteza spoljne konture. Željeni karakteristični polinom se usvaja u skladu sa željenom dinamikom sistema, a u cilju širenja oblasti robustne stabilnosti se proširuje faktorima

$$\prod_{i=1}^n (1 - b_i z^{-1})^i, \quad 0 \leq b_i \leq 0.9$$

pri čemu se nastoji da parametri  $n$  i  $b_i$  imaju što manje vrednosti, odnosno vrednost  $b_i$  se povećava do svog maksimuma pre nego što se poveća vrednost parametra  $n$ , i taj proces traje sve dok se ne zadovolji kriterijum robustne stabilnosti sistema. Sada, umesto identiteta (10) stoji

$$Q^o(z^{-1})R_d(z^{-1}) + z^{-1-k}P_y^o(z^{-1}) \equiv K_{de}(z^{-1}) \quad (12)$$

i polinomi  $P_y(z^{-1})$  i  $R_d(z^{-1})$  su rešenja ove Diophantineove jednačine, ali su rešenja i polinomi

$$R_d(z^{-1}) + N(z^{-1})z^{-1-k} + P_y^o(z^{-1}) - N(z^{-1})Q^o(z^{-1})$$

gde je  $N(z^{-1})$  proizvoljan polinom [6, 7]. Polinom  $R_d(z^{-1})$  je faktor polinoma  $R(z^{-1})$  ( $R(z^{-1}) = P_u(z^{-1})R_d(z^{-1})$ ). Praktično, ovde se radi o slučaju jednačine (10), ali sa slobodnim izborom polinoma  $T(z^{-1})$ , što se može koristiti u cilju širenja oblasti robustne stabilnosti. Ali, definisanje unutrašnjeg modela poremećaja nije više nezavisno od postupka sinteze u spoljnoj konturi i umesto (8), rešava se identitet

$$z^{-1-k}A(z^{-1}) + B_1(z^{-1})\Phi(z^{-1}) \equiv C(z^{-1})R_d(z^{-1}) \quad (13)$$

Implementacija NF filtra se podrazumeva. Sada, polinom  $P_r(z^{-1})$  sledi iz sledeće Diophantineove jednačine [1]

$$z^{-1-k}P_r^o(z^{-1}) + B_{1r}(z^{-1})\Phi_r(z^{-1}) \equiv K_{de}(z^{-1}) \quad (14)$$

gde polinom apsorpcije  $\Phi_r(z^{-1})$  definiše klasu referentnih signala čije se praćenje zahteva bez greške u stacionarnom stanju. Dalja modifikacija predfiltera  $P_r(z^{-1})$  može biti data izrazom

$$P_r^o(z^{-1}) = \frac{\prod_{i=1}^n (1 - b_i z^{-1})^i}{\prod_{i=1}^n (1 - b_i)}$$

čime se postiže ubrzanje odziva od strane zadate vrednosti, a da se pri tome ne naruši postignuti kvalitet stacionarnog stanja, niti oblast robustne stabilnosti [1].

U uslovima specifičnih primena IMPACT strukture mogu biti korišćene brojne modifikacije radi povećanja njene efikasnosti [1,100,101,102].

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je dat istorijski pregled nastanka i objašnjeni su osnovni koncepti primene i sinteze upravljačkih struktura sa unutrašnjim modelima za SISO sisteme. Istaknuta je bitna odlika ovih sistema da eksplicitno uključuju unutar upravljačke strukture model poremećaja u cilju efikasnog potiskivanja negativnih efekata na izlaz sistema (IMP) ili model objekta upravljanja u cilju estimacije efekata poremećaja i pogodne parametrizacije kontrolera za efikasno projektovanje robustne stabilnosti (IMC). U tom smislu, u radu nisu pomenuti sistemi sa opserversom koji takođe mogu biti sagledavani kao specijalan slučaj struktura sa unutrašnjim modelom. S druge strane, unutrašnji model objekta upravljanja može biti tumačen kao opservers poremećaja. Posebna pažnja je posvećena IMPACT strukturi sa unutrašnjim modelom koja eksplicitno uključuje i IMP i IMC zajedno. Posebna pažnja je posvećena IMPACT strukturi sa unutrašnjim modelom koja u sebi sadrži IMP i IMC i objedinjuje njihove prednosti. Naime, ova struktura ima prednosti i sa stanovišta jednostavnog postupka sinteze upravljačkog algoritma, efikasnosti apsorpcije poremećaja, uspešnog projektovanja robustne stabilnosti i sinteze RCS sistema. Štaviše, postupak sinteze i primene ove strukture nisu ograničeni nestabilnošću ili faznom neminimalnošću objekta upravljanja. Stoga se može očekivati da će IMPACT struktura sa vremenom sve više dobijati u značaju i primeni.

## LITERATURA

- [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, Lj.S. Draganović, M.S. Matijević, "Pregled i svojstva upravljačkih struktura sa unutrašnjim modelima", (rad po pozivu) Zbornik XLIII Konf. ETRAN-a, Zlatibor, 1999.
- [3] B.A. Francis and W.M. Wonham, "The internal model principle for linear multivariable regulators", *Appl. Math. Opt.*, vol. 2, pp. 170-194, 1975.
- [4] B.A. Francis and W.M. Wonham, "The role of transmission zeros in linear multivariable regulators", *Int. J. Control* 22(5), pp. 657-681, 1975.
- [5] B.A. Francis and W.M. Wonham, "The internal model principle of control theory", *Automatica*, vol. 12, pp. 457-465., 1976.
- [6] E.J. Davison, "The feedforward and feedback control of a general servomechanism problem", Parts I and II, *Proc. Eleventh Allerton Conf. on*

- Circuit and Systems Theory*, pp. 343-362, Univ. of Illinois, 1973.
- [7] E.J. Davison and A. Goldenberg, "The robust control of a general servomechanism problem: the servo compensator" *Automatica* vol. 11, pp. 461-471, 1975.
- [8] E.J. Davison, "A generalization of linear multivariable systems with unmeasurable arbitrary disturbances", *IEEE Trans. Aut. Control* AC-20 (6), pp. 788-795, 1975.
- [9] C.D. Johnson, "Further study of the linear regulator with disturbances - The case of vector disturbances satisfying a linear differential equation", *IEEE Trans. Aut. Control*, AC-15 (2), pp. 222-228, 1974.
- [10] J.B. Pearson and P. W. Staats, "Robust controllers for linear regulators", *IEEE Trans. Aut. Control*, AC-19 (3), pp. 231-234, 1974.
- [11] P.W. Staats Jr. and J. B. Pearson, "Robust solution of the linear servomechanism problem", *Proc. IFAC Sixth Triennial World Congress*, Boston/Cambridge, MA 1975.
- [12] W.A. Wolowich, "Multivariable system synthesis with step disturbance rejection", *IEEE Trans. Aut. Control*, AC-19 (2), 1974.
- [13] W.M. Wonham and J. B. Pearson, "Regulation and internal stabilization in linear multivariable systems", *SIAM J. Control* 12(1) pp. 5-18, 1974.
- [14] W. M. Wonham, *Linear multivariable Control: A Geometric Approach*. Lecture Notes in Economics and Math. Systems, vol. 101, Springer-Verlag, New York, 1974.
- [15] E.J. Davison, "The robust control of a servomechanism problem for linear time-invariant multivariable systems" *IEEE Trans. Autom. Control*, 2, pp. 25-34, 1976.
- [16] W.M. Wonham, "Towards an abstract internal model principle", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 6, N°11, pp. 735-740, 1976.
- [17] K.J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive control*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [18] G. Bengtsson, "Output regulation and internal models. A frequency domain approach", *Automatica*, vol. 13, pp. 333-345, 1977.
- [19] B. Francis, "The multivariable servomechanism problem from the input-output viewpoint", *IEEE Trans. Autom. Control*, 22, pp. 322-328, 1977.
- [20] O.R. Gonzalez and P.J. Antsaklis, "Internal models in regulation, stabilization and tracking", *Int. J. Control*, vol. 53, N°2, pp. 411-430, 1991.
- [21] M. Vidyasagar, *Control System Synthesis: a Factorization Approach*, Cambridge, Mass: MIT Press, 1985.
- [22] C.A. Desoer and C.L. Gustafson, "Algebraic theory of linear multivariable systems", *IEEE Trans. Autom. Control*, 29, pp. 909-917, 1984.
- [23] O.R. Gonzalez and P.J. Antsaklis, "Internal models over rings", *Linear Systems and Signal Processing*, edited by C. I. Byrnes, C. F. Martin, and R. E. Saeks (Amsterdam: Elsevier), pp. 41-48, 1987.
- [24] J.S.A. Hepburn and W.M. Wonham, "Error feedback and internal models on differentiable manifolds", *IEEE Trans. on Autom. Control*, 29, pp. 397-403, 1984.
- [25] J.S.A. Hepburn, "The role of internal models in regulation", *Proceedings of the 1985 American Control Conference*, pp. 1315-1321, 1985.
- [26] E.W. Kamen, "Tracking in linear time-varying systems", *Proceedings of the 1989 American Control Conference*, pp. 263-268, 1989.
- [27] C.R. Kelley, *Manual and Automatic Control*, New York: Wiley, 1968.
- [28] K. Craik, *The nature of Explanation*, Cambridge (U.K.): Cambridge University Press, 1967.
- [29] K. Oatley, *Brain Mechanisms and Mind*, London: Thames & Hudson, 1972.
- [30] G.A. Miller, E. Galanter, and K. H. Pribram, *Plans and the Structure of Behavior*, New York: Henry Holt, 1960.
- [31] M. Minsky, "A framework for representing knowledge", in P. H. Winston (ed.), *The Psychology of Computer Vision*, New York: McGraw-Hill, pp. 211-277, 1975
- [32] R.C. Conant and W.R. Ashby, "Every good regulator of a system must be a model of that system", *Int. J. Systems Sci.*, vol. 1, N°2, pp. 89-97, 1970.
- [33] Ya.Z. Tsytkin, "Adaptive invariant discrete-time control systems" (in Russian), *Avtom. Telemekh.*, N°5, pp.96-121, 1991
- [34] A. Kuhtenko, "Basic postulates of invariant theory creating" (in Russian), *Avtomatics*, N°2, pp. 3-13, 1984.
- [35] A. Kuhtenko, "Basic postulates of invariant theory creating II" (in Russian), *Avtomatics*, N°2, pp. 3-14, 1985.
- [36] A. Kuhtenko, *A issue of invariancy in automatic control* (in Russian), GITL-USSR, Kiev, 1963.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] K. Shannon, "Mathematical theory of a differential analyzer", *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 20, N°5, pp. 337-354, 1941.
- [40] C. D. Johnson, "Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems", *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-16, N°6, pp. 635-644, 1971.
- [41] S. Johnson, *Regulator theory in disturbance presence // Filtering and stochastic control in*

- dynamic systems*, (in Russian), World, Moscow, pp. 253-320, 1980.
- [42] E. J. Davison, "The output control at linear time invariant systems with unmeasurable arbitrary disturbances", *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-17, N<sup>o</sup>5, pp. 621-630, 1972.
- [43] M. Uonem, *Linear multivariable control systems*, (in Russian), World, Moscow, 1980.
- [44] R. Ortega, Yu. Tang, "Robustness of adaptive controllers - a Survey", *Automatica*, Vol. 25, N<sup>o</sup>5, pp. 651-677, 1989.
- [45] V.A. Nikolysky and I.P. Sevastyanov, "*K(E)* transform of time function in discrete-time systems", *Automatics and Electrotech.* (in Russian), World, Moscow, pp. 30-36, 1973.
- [46] C. D. Johnson, "Discrete-time disturbance accomodating control theory with applications to missile digital control", *J. Guidance and Control*, Vol. 4, N<sup>o</sup>2, pp. 116-125, 1981.
- [47] Ya.Z. Tsytkin, "Design of robust optimal control systems having plants with bounded parameter uncertainties" (in Russian), *Avtom. Telemekh.*, N<sup>o</sup>9, pp. 139-159, 1992.
- [48] Ya.Z. Tsytkin and U. Holmberg, "Robust stochastic control using the internal model principle and internal model control", *Int. J. Control*, vol. 61, N<sup>o</sup>4, P 809-822, 1995.
- [49] M. S. Matijević, "Strukturalna sinteza sistema digitalnog upravljanja sa unutrašnjim modelom", magistarska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1998.
- [50] Ya.Z. Tsytkin, *Basis of identification informatics theory*, (in Russian), Science, Moscow, 1984.
- [51] W. Messner and M. Bodson, "Design of adaptive feedforward algorithms using internal model equivalence", *Int. J. Control*, vol. 9, pp. 199-212, 1995.
- [52] C. Kempf, W. Messner, M. Tomizuka and R. Horowitz, "Comparison of four discrete-time repetitive control algorithms", *IEEE Control Systems*, vol. 13, N<sup>o</sup>5, pp. 48-54, 1993.
- [53] W. Messner and C. Kempf, "A comparison of four discrete-time repetitive control algorithms", Tech. Rep. CML91-029, Computer Mechanics Laboratory, University of California at Berkeley, 1991.
- [54] K. Chew and M. Tomizuka, "Steady-state and stochastic performance of a modified discrete-time prototype repetitive controller" *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 112, pp. 35-41, 1991.
- [55] M. Tomizuka and C. Kempf, "Design of discrete-time repetitive controllers with applications to mechanical systems", *Proc. 11th IFAC World Congr.*, 1990, Pergamon, Oxford, UK, P. 243-248, 1991.
- [56] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata and M. Nakano, "Repetitive control system - a new type servosystem", *IEEE Trans. Autom. Control.*, vol. 33, N<sup>o</sup>7, pp. 659-668, 1988.
- [57] M. Tomizuka, "On the desing of digital tracking controllers", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 115.,N<sup>o</sup>2, pp. 412-418, 1993.
- [58] G.F. Ledwich and A. Bolton, "Repetitive and periodic controller design", *IEEE Proceedings - D.*, vol. 140, N<sup>o</sup>1, pp. 19-24, 1993.
- [59] Ya.Z. Tsytkin, "New classes of discrete-time repetitive control systems" (in Russian), *Avtom. Telemekh.*, N<sup>o</sup>12, pp. 76-92, 1994.
- [60] K.K. Chew and M. Tomizuka, "Digital control of repetitive errors in disk drive systems", *IEEE Control Magazine*, vol. 10, N<sup>o</sup> 1, pp. 16-20, 1990.
- [61] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.: Prentice Hall, 1989.
- [62] G. Murad, D.W. Gu and I. Postlethwaite, "On the design of robust internal model-based controllers", *Int. J. of Control*, vol. 68, N<sup>o</sup>3, pp. 513-537, 1997.
- [63] D.C. Youla, J.J. Bongiorno and H.A. Jabr, "Modern Wiener-Hopf design of optimal controllers I. The single-input-output case", *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-21, pp. 3-13, 1976.
- [64] D.C. Youla, H.A. Jabr and J.J. Bongiorno, "Modern Wiener-Hopf design of optimal controllers I. The multivariable case", *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-21, pp. 319-338, 1976.
- [65] C.E. Garsia, D.M. Prett and M. Morari, "Model predictive control: Theory and Practice - a Survey", *Automatica*, vol. 25, N<sup>o</sup>3, pp. 335-348, 1989.
- [66] B.T. Polyak and Ya.Z. Tsytkin, "Robust stability of linear discrete-time systems" (in Russian), *Dokl. AN USSR*, vol. 316, N<sup>o</sup> 4, pp. 842-846, 1991.
- [67] Ya.Z. Tsytkin and K. Furuta, "Frequency-domain criteria of robust stability: discrete-time and continuous-time systems, a unified approach", *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 5, pp. 207-222, 1995.
- [68] Ya.Z. Tsytkin and B.T. Polyak, "Frequency domain criteria for robust stability of family of linear difference equations", *Journal of Difference Equations and Applications*, vol. 1, pp. 137-149, 1995.
- [69] Ya.Z. Tsytkin "Frequency domain criteria for robust performance of linear discrete-time systems" (in Russian), *Automatica*, N<sup>o</sup>3, p. 3-9, 1990.
- [70] Ya.Z. Tsytkin and B.T. Polyak, "Frequency domain criteria for robust stability and robust performance of linear discrete-time systems" (in Russian), *Automatica*, N<sup>o</sup>4, p. 3-9, 1990.
- [71] P.M. Frank, *Entwurf von Regelkreisen mit vorgeschriebenem Verhalten*, Karlsruhe, Germany: G. Braun, 1974.
- [72] G.C. Newton, L.A. Gould and J.F. Kaiser, *Analytical Design of Feedback Controls*, Wiley, New York, 1957.
- [73] O.J.M. Smith, "Closer control of loops with dead time", *Chemical Engineering Progress*, 53(5), pp. 217-219, 1957.

- [74] A. Sing and D.H. McEwan, "The control of a process having appreciable transport lag - A laboratory case study", *IEEE Trans. on Indust. Electron. Control Instruments*, vol. IECI-22, pp. 396-401, 1975.
- [75] M.R. Stojić, *Digitalni sistemi upravljanja*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1998.
- [76] J.M. Vandeursen and J.A. Peperstraete, "Internal model control with improved disturbance rejection", *Int. J. Control*, vol. 62, N<sup>o</sup>4, pp. 983-999, 1995.
- [77] H.C. Zirwas, "Die ergänzende Rückführung als Mittel zur schnellen Regelung von Regelstrecken mit Laufzeit", Ph.D. Thesis, TH Stuttgart, 1958.
- [78] W. Giloi, "Zur Theorie und Verwirklichung einer Regelung für Laufzeitstrecken nach dem Prinzip der ergänzenden Rückführung", Ph.D. Thesis, TH Stuttgart, 1959.
- [79] I.M. Horowitz, *Synthesis of Feedback Systems*, Academic Press, London, 1963.
- [80] G. Zames, "Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses", *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-26, pp. 301-320, 1981.
- [81] J.C. Doyle, "Analysis of control systems with structured uncertainty", *IEE Proc., Part D*, pp. 129-242, 1982.
- [82] J.C. Doyle and J.E. Wall, "Performance and robustness analysis for structured uncertainty", *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando, 1982.
- [83] J.A. Richalet, A. Rault, J.L. Testud and J. Papon, "Model predictive heuristic control: applications to an industrial process", *Automatica*, 14, pp. 413-428, 1978.
- [84] C.R. Cutler and B.L. Ramaker, "Dynamic matrix control-a computer control algorithm", *AICHE National Mtg*, Houston, Texas, 1979.
- [85] C.B. Brosilow, "The structure and design of Smith Predictors from the viewpoint of inferential control", *Proc. Joint Aut. Control Conf.*, Denver, Colorado, 1979.
- [86] C.E. Garcia and M. Morari, "Internal model control-1. A unifying review and some new results", *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.*, 21., pp. 308-323, 1982.
- [87] C.E. Garcia and M. Morari, "Internal model control-2. Design procedure for multivariable systems", *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.*, 24., pp. 472-484, 1985.
- [88] C.E. Garcia and M. Morari, "Internal model control-3. Multivariable control law computation and tuning guidelines", *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.*, 24., pp. 484-494, 1985.
- [89] A. Datta and J. Ochoa, "Adaptive internal model control: Design and stability analysis", *Automatica*, vol. 32, N<sup>o</sup>2, pp. 261-266, 1996.
- [90] A. Datta and J. Ochoa, "Adaptive internal model control: H<sup>2</sup> optimization for stable plant", *Automatica*, vol. 34, N<sup>o</sup>1, pp. 75-82, 1998.
- [91] A. Zheng, M.V. Kothare and M. Morari, "Anti-windup design for internal model control", *Int. J. Control*, vol. 60, N<sup>o</sup>5, pp. 1015-1025, 1994.
- [92] L. Harnefors and H.P. Nee, "Robust current control of AC machines using the internal model control method", *Conference Record of the 1995 IEEE Ind. Applications Society 30th Annual Meeting*, Orlando, pp. 303-309, October 1995
- [93] T.H. Lee, T.S. Low, A.A. Mamun and C.H. Tan, "Internal model control (IMC) approach for designing disk drive servo-controller", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 42, N<sup>o</sup>3, pp. 248-256, 1995.
- [94] P.J. Gawthrop, R.W. Jones and D.G. Sbarbaro, "Emulator-based control and internal model control: Complementary approaches to robust control design", *Automatica*, pp. 1223-1226, 1996.
- [95] Ya.Z. Tsyppkin, "Robust adaptive control systems", (in Russian), *Dokl. AN USSR*, vol. 315, N<sup>o</sup> 6, pp. 1314-1317, 1990.
- [96] Ya.Z. Tsyppkin, "Optimal discrete control systems with nonminimal phase plants" (in Russian), *Avtom. Telemekh.*, N<sup>o</sup>11, pp. 96-118, 1991.
- [97] Ya.Z. Tsyppkin, and P.V. Nadezhdin, "Robust continuous control systems with internal models", *Control Theory and Advanced Technology*, 9, 1993.
- [98] Ya.Z. Tsyppkin, "Robust internal model control", *50th Anniversary Issue of DSCD, ASME Transactions*, 115, N<sup>o</sup>2(B), pp. 419-425, 1993.
- [99] K.J. Astrom and B. Wittenmark, *Computer controlled systems*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.
- [100] M.R. Stojić, M.S. Matijević, "Structural design of digital control systems with immeasurable arbitrary disturbances", *The 9th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, 2001.
- [101] M.R. Stojić, M.S. Matijević and Lj.S. Draganović, "A robust Smith predictor modified by internal models for integrating process with dead time", *IEEE Trans. On AC*, Vol. 46, N<sup>o</sup>8, P. 1293-1298, August 2001
- [102] M.R. Stojić, M.S. Matijević, "Application of internal models in the design of digitally controlled electrical drives", *Electronics*, Vol. 6, N<sup>o</sup>2, P. 31-36, 2002.

## SUMMARY

### CONTROL SYSTEMS WITH INTERNAL MODELS: A REVIEW

*In the control system structural synthesis of there are three ways of internal model implementation: IMP (Internal Model Principle), IMC (Internal Model Control), and Tsytkin's IMPACT (Internal Model Principle and Control Together) structure. In the IMP, the model of external disturbance is included into the control structure in order to eliminate the influence of disturbance on controlled variable. In the IMC, the control structure comprises the plant model which enables the compensation of plant parameter changes. The IMPACT structure has been recently developed and it reveals advantages of the IMP and IMC control structures since it includes models of both the external disturbance and system plant and thus it attains the elimination of disturbance influence and a high system robustness with respect to changes of plant parameters. This paper gives the review of control structures with internal models, their features and capabilities of parameter design.*

**Key words:** Internal models, IMPACT structure, IMC, IMP, Absorption Principle