

KOMPENZACIONI KONTROLNI ALOGRITAM ZA PRAĆENJE DINAMIČKIH OBJEKATA

Predrag Petrović, Tehnički fakultet Čačak, Svetog Save 65, 32000 Čačak

Sadržaj – Ovaj rad nudi efektivan pristup rešavanju problema dizajniranja automatskih kontrolnih algoritama, koji pored toga nudi i visok stepen dinamičke sigurnosti u sistemima. Pristup se zasniva na primeni koncepta kompenzacije poremećaja. Realizovan je na osnovu procene (estimacije) proširenih faznih osobina samih komponenti, koje se dodaju kontrolnom pravilu, čime se omogućava održavanje željenog nivoa kvaliteta sistema u slučaju izuzetno zahtevnih numeričkih preračunavanja. Potvrđen je izbor modela poremećaja i parametara praćenja. Ponuđen je modifikovani kontrolni sistem sa kompenzacijom poremećaja. Prednosti ovakvog pristupa prikazane su na primeru uređjaja za kontrolu visine aviona. Dati su i rezultati numeričkog modeliranja.

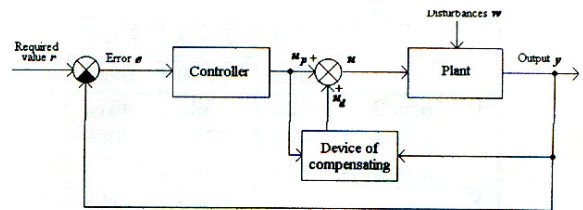
1. UVOD

Primena principa adaptacije povećava pouzdanost kontrole u slučaju kada dolazi do značajnih modifikacija dinamičkih karakteristika pogona, pri čemu se podrazumeva optimizacija važećih radnih uslova kod promenljivih faktora. Pored toga povećava se pouzdanost sistema, standardizuju odvojeni kontrolni sistemi i sklopovi, omogućava sniženje tehnoloških zahteva kod pojedinačnih delova sistema, pri čemu se i smanjuje vreme potrebno za dizajn i razvoj [1].

Adaptivni sistemi se dele u dve kategorije [2]: direktni adaptivni sistemi i indirektni adaptivni sistemi. Kod sistema prve kategorije parametri se tako podešavaju da koordinate na izlazu sistema odgovaraju izlaznim koordinatama referentnog modela. Podešavanje parametara se vrši na osnovu razlike između kontrolisanih koordinata određenog sistema i usvojenog modela, ili na osnovu razlike u njihovim frekventnim karakteristikama.

Kod indirektnih adaptivnih sistema za kontrolu prvo se izvrši indentifikacija pogona, a zatim se podese parametri regulatora, i to na takav način da sistem sa zatvorenim petljom zadovolji određena, unapred definisana svojstva. Regulatori ovakvih sistema se često nazivaju samopodešavajućim. U ovom radu ćemo se baviti upravo sistemima koji su u stanju da izvrše kompenzaciju poremećaja.

Pravi kontrolni sistemi rade u uslovima različitih poremećaja. Termin "poremećaj" se može koristiti za posebnu kategoriju ulaznih signala u sistem, koji nisu unapred precizno određeni. Dizajner sistema može da ih ne nadgleda, tj. da ovi signali budu neusmereni (nevođeni). Zbog toga je neophodno projektovati takav kontrolni sistem koji će pružiti podršku i održavati određeni kvalitet uprkos svim mogućim poremećajima, a pri tome za dati sistem, raditi u stvarnim radnim uslovima. Kontrolni sistemi sa kompenzacijom poremećaja [3] ili robusni optimalni sistemi [4] zadovoljavaju ove zahteve. Na slici 1 prikazana je poznata šema sistema koji realizuje kompenzaciju poremećaja.



Slika 1: Kontrolni sistem sa regulatorom za kompenzaciju poremećaja

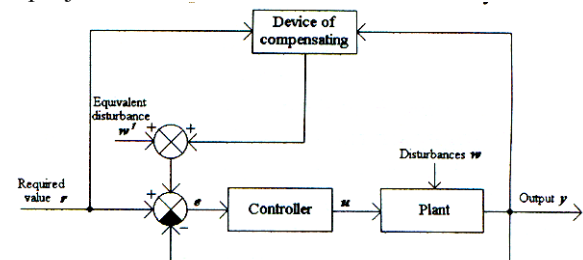
Da bi se poremećaji otklonili u potpunosti, kontrolna promenljiva se standardno definiše kao:

$$u = u_p + u_d \quad (1)$$

gde u_p predstavlja regularnu kontrolu promenljivu, a u_d kontrolu promenljivu kojom se kompenzuje poremećaj.

Potpuna kompenzacija poremećaja je moguća samo na osnovu njihovih izmerenih vrednosti, koje ne odgovaraju uvek stvarnim vrednostima. Moguće je izvršiti i delimičnu kompenzaciju poremećaja putem proširene procene ekvivalentnih poremećaja. Šema na slici 1 ne uzima u obzir parametarska odstupanja u regulatoru, već samo u kontrolisanom pogonu.

U ovom radu, istražuju se svojstva modifikovanog adaptivnog kontrolnog sistema, sa kompenzacijom poremećaja (slika 2). Ova šema uzima u obzir parametarska odstupanja u svim zatvorenim sistemima.



Slika 2: Modifikovani kontrolni sistem sa regulatorom za kompenzaciju poremećaja

Prisustvo redukovano procenjivača poremećaja, koji se može koristiti u različitim realizacijama, predstavlja zajedničko svojstvo kontrolnih sistema sa kompenzacijom. Glavna prednost kontrolnih sistema sa kompenzacijom predstavlja upravo linearnost u opisu svih delova modela sistema. Ovim se pojednostavljaju problemi analize i sinteze, i omogućuje se primena poznatih integrisanih sistema za projekciju-MATLAB, MATCAD, itd.

2. KONTROLA SA KOMPENZACIJOM KOD DINAMIČKIH OBJEKATA

Problem kompenzacije poremećaja koji utiču na rad realnih sistema bio je predmet istraživanja autora u brojnim objavljenim radovima [3,4,5]. Međutim, osim običnih "brzih" poremećaja, koji se modeluju kao "beli" ili "obojeni" šum, "spori" ili parametrični poremećaji se takođe javljaju u sistemima (nulto kretanje, promena parametara objekta,

habanje kontrolnih uređaja, itd.). Obično su komponente ovih “sporih” vektora poremećaja predstavljene kao polinomi eksponencijalnog oblika u funkciji vremena, sa nepoznatim, ali konstantnim faktorima [3]. Zamenom ovih faktora faznim koordinatnim vektorima, dobijamo “prošireni” sistem, na koji tada jedino utiču “brzi” poremećaji. Daljom procenom faznih (proširenih) komponenti, i unošenjem odgovarajuće korekcije u kontrolni zakon, moguće je dobiti sistem koji toleriše “spore” poremećaje.

Razmotrimo linearni model objekta (pogona ili procesa):

$$\dot{x}_p = Ax + Bu + v; \quad y = Cx_p \quad (2)$$

i kontrole:

$$u = K(r - y) \quad (3)$$

gde x_p predstavlja fazne koordinate pogona, v -vektor spoljašnjih poremećaja, y -izlaz pogona (output), r -komandni signal, A i B su matrica stanja i kontrolna matrica odgovarajućih dimenzija, C -izlazna matrica, K -povratna informaciju za izlaznu matricu.

Jednačine poremećenog sistema dobija tako što ćemo predstaviti $A = A_m + A_d$, $B = B_m + B_d$:

$$\dot{X}_d = A_m x_d + B_m u + A_d x_d + B_d u + v \quad (4)$$

gde A_m , B_m predstavljaju matricu stanja i kontrolnu matricu za neporemećeni način rada referentnog modela, A_d , B_d -matrice poremećaja parametara, x_d -fazne koordinate poremećenog sistema.

Dinamika poremećenog sistema sa zatvorenom petljom se može prikazati kao:

$$\dot{X} = A_s x + G(r + w) \quad (5)$$

gde su $A_s = A - BKC$, $G = -BK$, w -ekvivalent redukovano poremećaja. Uzimamo u obzir i parametarske, kao i spoljne poremećaje, koji se uvode na odgovarajuća mesta kao ulazi na slici 2:

$$Gw = A_d x_d + B_d u + v \quad (6)$$

Vektor w se može predstaviti kao eksponencijalni niz u funkciji vremena t :

$$w = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n \quad (7)$$

Ovo nam omogućuje da dinamiku poremećaja opišemo kao:

$$\dot{w} = A_w w \quad (8)$$

Prošireni sistem, tj, nominalni pogon sa poremećajem se može prikazati kao:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s & G \\ 0 & A_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (9)$$

gde je $A_s = A_m - B_m K C_m$ - matrica sistema sa zatvorenom petljom i regularnom kontrolom oblika $u = -Ky$, C_m -izlazna matrica nominalnog pogona, A_w -matrica koja opisuje dinamiku poremećaja.

Kontroler koji obavlja kompenzaciju poremećaja, uzima u obzir i procenu stanja proširenog sistema (9), radi formiranja “kontrolne sa kompenzacijom” ili kompenzacionog komandnog signala \hat{w} .

Procena dinamike stanja, koja obuhvata i dinamiku pogona i dinamiku poremećaja, predstavljena je jednačinom:

$$\dot{x}_e = A_e x_e + G_e r + L_e (y - C_e x_e) \quad (10)$$

gde A_e , B_e predstavljaju matricu stanja i kontrolnu matricu:

$$A_p = \begin{bmatrix} A_s & G \\ 0 & A_w \end{bmatrix}, G_p = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix}, C_p = [C_H \quad 0], x_e = [\hat{x} \quad \hat{w}]^T \quad (11)$$

U ovom slučaju kompenzator poremećaja opisan je sa:

$$\hat{w} = C_w w \quad (12)$$

gde je C_w ekvivalentna matrica observiranih poremećaja.

Dinamika punog sistema, tj. pogona i kompenzacionog regulatora iskazuje se kao:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p x_p & -G_p C_w \\ LC_p & A_e - LC_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_p \\ G_e \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Razlika između šema, opisanih slikama 1 i 2, rezultira u različitim svojstvima dinamike sistema. Biće dati primeri koji potvrđuju ove teoretske postavke.

Pretpostavićemo da se tranzijentni procesi u observeru mnogo brže završavaju nego kod samog objekta koji se posmatra. Razlike u njihovoj dinamici imaju za posledicu to da dok se spori procesi znatno menjaju unutar samog objekta, za to vreme dolazi do stabilizacije brzih procesa u observeru. Ovo se može opisati uvođenjem malog parametra unutar datih jednačina kao što je i predloženo u radu [6], kojim se vrši opisivanje brzopromenljivih varijabli. Na taj način se sistem jednačina za objekat i regulator može predstaviti u nelinearnom obliku:

$$\dot{X}_d = e * f_1(x_d, x_e, u) \quad (14)$$

$$\dot{X}_e = f_2(x_d, x_e, u)$$

gde x_d predstavlja fazne koordinate objekta opisanog relacijom (4) koje odgovaraju sporom kretanju, x_e - fazne koordinate obsvera opisanog jednačinom (10) pri brzom kretanje; e -novouvedeni mali parametar.

Za sistem opisan sa (14) uzimamo u razmatranje i prateći sistem oblika:

$$\dot{x}_e = f_2(x_d, x_e, u) \quad (15)$$

$$\dot{x}_d = const$$

koji se razlikuje od (14) u tome što fiksira “spore” promenljive na određenom konstantnom nivou. Kako je to i dato u izrazu (15) $x_d = const.$, w koje je definisano sa (6) može se takođe usvojiti kao konstanta. Sa stanovišta Bogoljubovljeve (Bogolubov) teoreme o usrednjavanju [6], x_d -komponente za svaku od trajektorija sistema opisanog jednačinom (14), aproksimiraju se uniformno sa tačnošću u 0 ($e^{1/3}$), na intervalu $\dot{S}0, T/e\dot{C}$, sa trajektorijama za koje je diferencijalna inkluzije definisana kao:

$$\dot{X}_d = e * V(x_d);$$

$$V(x_d) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \int_0^n f_1(x_d, x_e(t), u(t)) dt \quad (16)$$

U gornjoj jednačini $V(x_d)$ predstavlja graničnu vrednost.

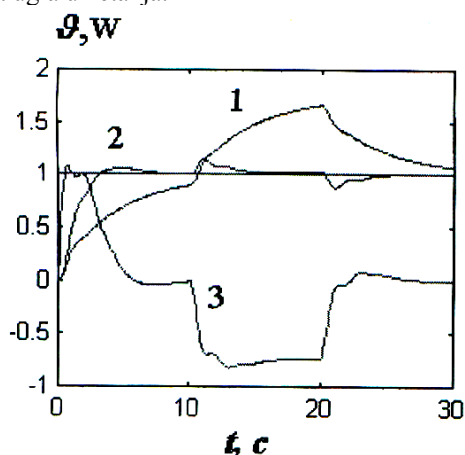
Integral (16) se izračunava duž trajektorije pratećeg sistema (15) za moguću i primenljivu kontrolnu proceduru i uz poznate početne uslove.

Stoga, pri uslovno malom e (ili pri proizvoljno velikoj brzini observera), procena poremećaja w , opisanog izrazom $\hat{w} = const$, može uslovno biti slična realnom poremećaju. Sa stanovišta teorije nepromenljivosti (invarijantnosti), dodatna komponenta $u = -B^+ \hat{w}$, se takođe kontroliše, pored regularne $u = Kx$ koja se koristi za kompenzaciju poremećaja, pri čemu

opisuju dinamiku kontrolnih uređaja. Ovako je parametarski poremećaj unet u jednačine objekta, menjanjem aerodinamičkog faktora, čime se oslikava efikasnost kontrolnih uređaja:

$$A = \begin{bmatrix} -1.48 & 0 & 1 & -0.074 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -6.82 & 0 & -0.66 & -2.46 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -251 & -31 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 251 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Moment spoljašnjeg poremećaja primenjen je i na objekat, u intervalu od 10 do 20 sekundi. Modeliranje je izvršeno putem redovnog kontrolnog sistema, i uvođenjem kompenzacijskog dodatka oblika $u = -B^+ \hat{w}$. Rezultati ovog modeliranja su prikazani na slici 6. Vreme semplovanja odgovara vremenu od 0.1sec, $\theta_3=1$, što predstavlja traženu vrednost ugla uzletanja.



Slika 6: Prelazni procesi kod poremećenog sistema: 1-ugao uzleta pod redovnom kontrolom, 2-ugao uzleta pod kombinovanom kontrolom, 3-procena poremećaja.

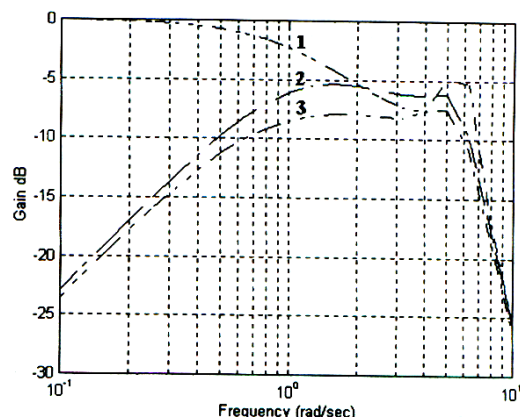
Frekventne karakteristike reakcije kontrolnog sistema uzletanja, sa primenom različitih regulatora prikazane su na slici 7. Krivulja 1 odgovara kontrolnom sistemu sa PID regulatorom, krivulja 2 kontrolnom sistemu sa kompenzacijom poremećaja u kontrolnom kanalu, krivulja 3 kontrolnom sistemu sa kompenzacijom poremećaja u kanalu komandnog signala. Krivulja broj 3 je niža od ostalih (kao i u prvom primeru). Minimalna vrednost je -24 db na 10^{-1} rad/sec. Logaritamske krive magnitude sistema sa ulaznim komandnim signalom i zatvorenom petljom ponašaju se kao na slici 3.

Rezultati modeliranja su pokazali da uvođenje kompenzacijskog dodatka u kontrolni zakon poboljšava kvalitet procesa regulacije, i približava ih referentnim tranzijentnim vrednostima. Na ovaj način, osetljivost sistema na promene parametara objekta i efekat spoljašnjih poremećaja se može znatno umanjiti.

4. ZAKLJUČAK

Obavljena istraživanja su potvrdila efikasnost ponuđenih algoritama, koji sistemu daju svojstvo slabe osetljivosti na parametarske i spoljašnje poremećaje. Primena predloženih struktura kompenzacije poremećaja omogućila je poboljšanje

frekvencijskih karakteristika u znatnoj meri u kanalu poremećaja, a isto tako je povećala otpornost (robustnost) sistema. Stoga se može zaključiti da ponuđeni algoritmi omogućavaju kontrolu objekata u uslovima nestabilnosti. Nadamo se da će ova istraživanja naići na realizaciju i u praksi.



Slika 7: Bodeov dijagram sistema koji kontroliše proces uzletanja

LITERATURA

- [1] A.A.Voronov, V.Yu. Rutkovsky, "State-of-the-art and prospects of adaptive system", *Automatica*, pp.547-557, V.20, N5, 1984.
- [2] K.J.Astrom and B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.
- [3] C.D.Johnson, "Disturbance accomodationg control theory", *Control and Dynamic Systems, Advance in Theory and Applications*, edited by C.T.Leondes, Academic Press, New York, 1976.
- [4] Ya.Z.Tsyppkin, "Synthesis of Robust Optimal Control Systems for Objects under Bounded Uncertainty", *Automatica and Telemechanics*, pp.139-159, N9, 1992.
- [5] *Handbook on the automatic control theory*, edited by A.A.Krasovsky, Moskow, Nauka, 1987.
- [6] P.V.Demidovich, "Lectures on the mathematical theory of stability", Moskow, Nauka, 1967.
- [7] B.C.Kuo, "Digital Control Systems", Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980.

Abstract - An effective approach for solving problems of design of automatic control algorithms, which realizes high dynamic accuracy in systems, is offered. It is based on application of the disturbances compensation concept. Composed, received on the basis of estimation of extended phase components are added to the control law that allows to keep desired system quality in the case of supernumerary situation. A choice of disturbance model and observer parameters is substantiated. Modified control system with disturbances compensation is offered. The benefits of this approach are illustrated by the aircraft pitch control. The results of numerical modeling are given.

COMPENSATING CONTROL ALGORITHM FOR DYNAMIC OBJECT

Predrag Petrović