

Milan Matijević, Rajko Radonjić**

UPRAVLJANJE PONAŠANJEM VOZILA NA PUTU

Rezime: Kvalitet odgovora bočne dinamike vozila na dejstvo vozača preko upravljača je u direktnoj relaciji sa odnosima aktivne bezbednosti. Poboljšanje graničnih performansi ponašanja vozila na putu, u današnje vreme, ne može biti realizovano samo sa pasivnim sistemima. Umesto toga, neophodni su sistemi aktivnog upravljanja. U ovom radu analizirana je sprega bočnog klizanja i ugaone brzine zaokretanja vozila oko vertikalne ose, kao odgovora vozila na zaokretanje točka upravljača. Razmotrena su dva koncepta upravljanja bočnom dinamikom vozila sa aspekta kompenzacije bočnog klizanja i podesnog oblika upravljanja ugaonom brzinom vozila oko vertikalne ose. Formiran je prikladan model vozila za realizaciju zakona upravljanja. Rezultati istraživanja sa kompjuterskom simulacijom pokazuju da uvedeni zakon upravljanja daje prihvatljive performanse ponašanja vozila na putu.

KLJUČNE REČI: ponašanje vozila, upravljanje, bočno klizanje, model, simulacija

VEHICLE HANDLING CONTROL

Abstract: The quality of the vehicle lateral dynamics response to driver steering input is in direct relation with active safety. Improving limit performance of vehicle handling in present time can not be realized only with passive systems. Instead, active control systems will be required. In this paper the side-slip and yaw rate vehicle coupling response to steering wheel input are analysed. Two control concepts for the vehicle lateral dynamics with respect to side-slip compensation and suitable form of yaw rate control are considered. An appropriate vehicle model to introduce control laws is formed. The results of the investigation with computer simulation have shown that introduced control law yields acceptable vehicle handling performance.

KEY WORDS: vehicle handling, control, side-slip, model, simulation

1. UVOD

Na razvoj vitalnih sistema motornog vozila, poslednjih godina, bitno utiče uvođenje tehnologije aktivne kontrole njihovih radnih funkcija i procesa. Ove trendove treba shvatiti kao posledicu sve strožijih zahteva zakonodavca ali i tržišta, kao i želje za očuvanjem renomea i postizanjem konkurentskog prestiža proizvođača [1]. Primenu aktivnih sistema pospešuje progres u razvoju kompjuterske tehnike, inteligentnih sistema, merne tehnike i ostalih pratećih disciplina [2].

Aktivna kontrola, u današnjim uslovima, pokriva gotovo sve stepene slobode kretanja dinamičkog sistema vozila. Pri tome, od posebnog su značaja nove tehnologije kontrole za poboljšanje stabilnosti i upravljivosti motornih vozila. Naime, i pored značajnih rezultata u optimizaciji konstrukcije konvencionalnog vozila, njegov dinamički sistem ispoljava nepovoljne karakteristike kao objekat upravljanja. Multivarijabilnost sistema, uzajamna sprega upravljanih promenljivih otežavaju funkciju vozača, odnosno, usložavaju procedure koncipiranja, projektovanja i realizacije regulatora i strukture sistema aktivne kontrole.

Imajući u vidu istaknute probleme, u našim istraživanjima smo obuhvatili sledeće segmente: izbor prikladnog modela vozila za objašnjenje postavljenog cilja, razmatranje mogućih strategija upravljanja ponašanjem vozila na

** Dr Milan Matijević, docent, Mašinski fakultet, Kragujevac, e-mail: mmatijevic@ptt.yu

Dr Rajko Radonjić, red. prof., Mašinski fakultet, Kragujevac, e-mail: rradonjic@knez.uis.kg.ac.yu

putu, upravljačka struktura varijante upravljanja svim točkovima vozila, implementacija koncepta aktivnog sistema, rezultati simulacije i zaključci.

2. MODEL VOZILA I MOGUĆE STRATEGIJE UPRAVLJANJA

Fizički model bočne dinamike vozila, na sl. 1., po svojoj strukturi i parametrima, prikladan je za sagledavanje postavljenog problema i izbor koncepta upravljanja. Odgovarajuće diferencijalne jednačine kretanja, prikazane u implicitnom obliku:

$$A_1[m, v, k_1, k_2, (s+..)]\alpha + E_1[m, v, a, b, k_1, k_2]\dot{\epsilon} = D_{11}[k_1]\delta_1 + D_{21}[k_2]\delta_2 \quad (1)$$

$$A_2[a, b, k_1, k_2]\alpha + E_2[I, v, a, b, k_1, k_2, (s+..)]\dot{\epsilon} = D_{21}[a, k_1]\delta_1 + D_{22}[b, k_2]\delta_2 + M \quad (2)$$

$$M = M_1[s_1, F_{k1}, F_{k2}] + M_2[s_2, F_{k3}, F_{k4}] \quad (3)$$

$$\left[s^2 \right] y = Y[v, (s)](\epsilon + \alpha) \quad (4)$$

ukazuju na sprege izlaznih promenljivih, $\alpha \rightarrow \dot{\epsilon}$, bočno klizanje, rotaciono kretanje; ulaznih promenljivih, $\beta_v \rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_2$, ugao zaokretanja, točka upravljača, prednjih točkova, zadnjih točkova, M, obrtni moment u kanalu rotacionog kretanja i uticajne parametre koeficijenata, A_i, E_i, M_i, D_{ji} , koji se mogu grupisati kako sledi: m, I - parametri masa vozila, a, b, s_1, s_2 - geometrijski parametri, k_1, k_2 - parametri linearizovanih karakteristika pneumatika, v - brzina kao parametar režima kretanja, zavisno od strukture modela, kao ulazna ili izlazna promenljiva, F_{ki}, Y_{ki} - pokazatelji interakcije sistema, pneumatik - kolovoz - aktivne komponente. Submodel (3) ukazuje na uticajne faktore momenta uvedenog direktno u kanal rotacionog kretanja, alternative, upravljačka ili poremećajna promenljiva. Submodel (4), ukazuje na uticajne parametre i spregu upravljanih promenljivih - bočno pomeranje, rotaciono kretanje, bočno klizanje, respektivno.

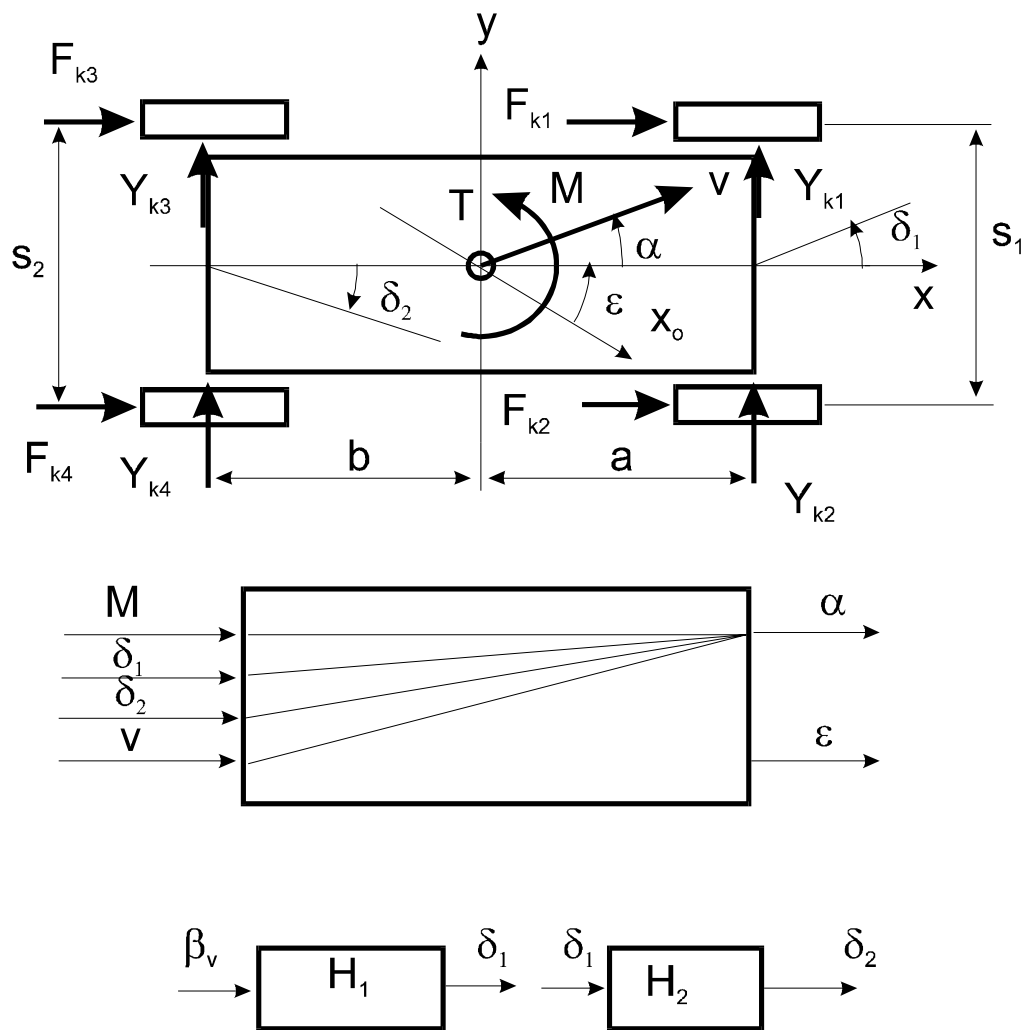
Prevodjenje jednačina (1) - (4) u eksplicitnu formu i primenom Laplasove transformacije, mogu se relevantni izlazi sistema prema sl. 1, iskazati preko ulaza i prenosnih funkcija aktivnih kontura :

$$\alpha(s) = \frac{A_{\delta 1}(s)\delta_1(s) + A_{\delta 2}(s)\delta_2(s) + A_M(s)M(s)}{\Delta(s)} \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}(s) = \frac{E_{\delta 1}(s)\delta_1(s) + E_{\delta 2}(s)\delta_2(s) + E_M(s)M(s)}{\Delta(s)} \quad (6)$$

Na osnovu (5) i (6), sagledavaju se moguće strategije upravljanja bočnom dinamikom vozila: 1/ $\delta_1 \neq 0, \delta_2 = 0, M = 0$, - prednji točkovi upravljački, 2/ $\delta_1 \neq 0, \delta_2 \neq 0, M = 0$ - prednji i zadnji točkovi upravljački, 3/ $\delta_1 \neq 0, \delta_2 \neq 0, M \neq 0$ - upravljanje svim točkovima i dodatno uvedena upravljačka promenljiva, obrtni moment u kanalu rotacionog kretanja vozila realizovan razlikom podužnih sila levih i desnih točkova pri režimima vuče ili kočenja. Ove promenljive se mogu na različite načine dovesti u vezu sa upravljanim promenljivim uz korišćenje direktnih i povratnih sprega.

Strategije upravljanja prednjim točkovima i svim točkovima u relaciji su sa mehanizmom generiranja bočnih sila vođenja u kontaktu pneumatik kolovoz. U prvom, konvencionalnom slučaju, ovaj mehanizam uključuje sledeće redno spregnute elemente : točak upravljača - sistem za upravljanje - prednje točkove - odnose bočne dinamike u početnoj fazi zaokretanja prednjih točkova - generiranje centrifugalne sile u centru masa vozila - generiranje bočne reakcije u kontaktu zadnjih neupravljivih točkova - generiranje ugla skretanja zadnje osovine - uspostavljanje dinamičke ravnoteže. U slučaju upravljanja svim točkovima period uspostavljanja dinamičke ravnoteže pri zaokretanju vozila je znatno kraći a broj uključenih elemenata sa redno paralelnim vezama, manji. U tom smislu koncept upravljanja svim točkovima u odnosu na konvencionalni, doprinosi [3] : 1/ skraćenju faznog kašnjenja u translaciji i rotaciji vozila, 2/ smanjenju ugla bočnog klizanja, 3/ povećanju stabilnosti, 4/ boljoj maneuvrivosti pri nižim brzinama, 5/ postizanju željenog odgovora vozila na dejstvo upravljača, 6/ održavanju željenog odgovora pri dejstvu poremećaja i promeni parametara vozila, 7/ bolji odgovor pri režimima kretanja na granici prijanjanja.



Slika 1. Model bočne dinamike motornog vozila i odgovarajuće strukturne šeme sistema i podsistema

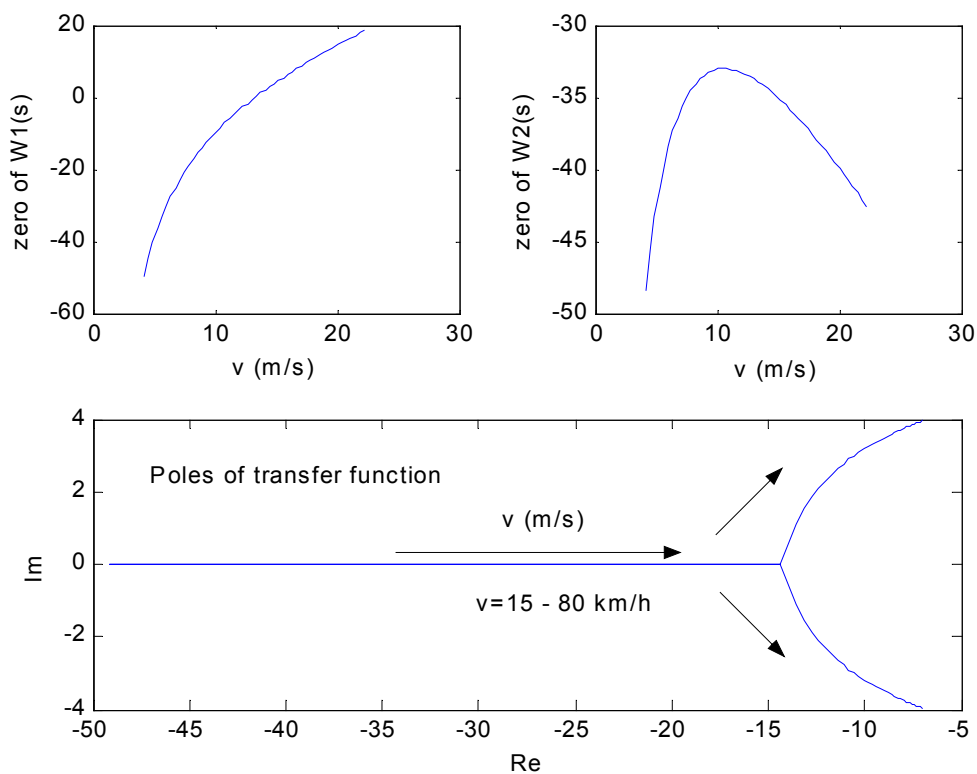
U ovom radu je ispitana mogućnost da se putem automatskog zaokretanja zadnjih točkova ugao bočnog klizanja α , održava na nultoj vrednosti bez obzira na promenu brzine vozila i druge poremećaje. U tom smislu, osmišljena je modifikacija IMPACT (Internal Model Principle and Control Together) upravljačke strukture sa parametrima koji imaju jasno fizičko značenje. Predložena struktura omogućava jednostavno podešavanje robustnih i dinamičkih performansi sistema upravljanja. Upravljački koncept se pokazuje uspešnim u domenu postavljenog upravljačkog cilja bez obzira na širok opseg promena parametara objekta upravljanja. Uspešnost strukture se pokazuje u odnosu na performansu direktno upravljane promenljive α , ali se u slučaju indirektno upravljanih promenljivih kao što su $\dot{\epsilon}$, \dot{y} , i y jasno pokazuje da rešenje integralnog problema treba tražiti u sintezi multivariabilnog regulatora, iako i predloženo rešenje pozitivno utiče na dinamiku pomenutih promenljivih.

Objekt upravljanja je multivariabilan, i opisan je linearnim diferencijalnih jednačinama sa promenljivim koeficijentima, jer je brzina vozila promenljiva (1)-(4). Konkretni oblici izraza (5) - (6), za strategiju upravljanja, $\delta_1 \neq 0$, $\delta_2 \neq 0$, iskazani su u funkciji polaznih parametara:

$$\alpha(s) = \frac{2\kappa_1 I s + 4\kappa_1(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2)/v - 2a\kappa_1\left(mv + \frac{2}{v}(a\kappa_1 - b\kappa_2)\right)}{I v m s^2 + [2(\kappa_1 + \kappa_2)I + 2m(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2)]s + c(\kappa_1 + \kappa_2)(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2) - 2(a\kappa_1 - b\kappa_2)\left(mv + \frac{2}{v}(a\kappa_1 - b\kappa_2)\right)} \delta_1(s) + \frac{2\kappa_2 I s + 4\kappa_2(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2)/v + 2b\kappa_2\left(mv + \frac{2}{v}(a\kappa_1 - b\kappa_2)\right)}{I v m s^2 + [2(\kappa_1 + \kappa_2)I + 2m(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2)]s + c(\kappa_1 + \kappa_2)(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2) - 2(a\kappa_1 - b\kappa_2)\left(mv + \frac{2}{v}(a\kappa_1 - b\kappa_2)\right)} \delta_2(s) \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}(s) = \frac{1}{I s + \frac{2}{v}(a^2\kappa_1 + b^2\kappa_2)} (2a\kappa_1\delta_1(s) - 2b\kappa_2\delta_2(s) - 2(a\kappa_1 - b\kappa_2)\alpha(s))$$

a sa tačke gledišta regulacije ugla α , od interesa je analiza funkcija prenosa koje imaju direktan uticaj na α . Tako je na sledećem dijagramu ilustrovan uticaj promene brzine vozila na kretanje nula i polova funkcija prenosa $W_1(s)$ i $W_2(s)$ ($\alpha(s) = [W_1(s) \ W_2(s)] \cdot [\delta_1(s) \ \delta_2(s)]^T$). Ilustrovani su efekti promene brzine vozila u opsegu od 4.16÷22.22 m/s (15÷80km/h), a za parametre vozila $m=1485\text{kg}$, $a=1.163\text{m}$, $b=1.402\text{m}$, $\kappa_1=39036\text{N/rad}$, $\kappa_2=42309\text{N/rad}$, $I=1334\text{kgm}^2$.



Slika 2. Efekti promene brzine na kretanje nula i polova funkcija prenosa $W_1(s)$ i $W_2(s)$ ($\alpha(s) = [W_1(s) \ W_2(s)] \cdot [\delta_1(s) \ \delta_2(s)]^T$).

Radi se o multivarijabilnom intervalnom objektu upravljanja. Intervali u kojima se kreću koeficijenti diferencijalnih jednačina su vrlo široki te bi bilo neophodno koristiti neku od metoda sinteze robustnih regulatora. Bez obzira na stvarnu složenost OU, metode sinteze upravljačkih algoritama obično koriste jednostavnije modele objekta upravljanja. Polovi sistema su realni ili veoma dobro prigušeni (u opsegu posmatranih promena brzine vozila), i promene ugla α mogu biti modelirane na sledeći način

$$\alpha(s) = \left(\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} + \Delta W(s) \right) (\delta_2(s) + d(s)) \quad (8)$$

gde $\Delta W(s)$ predstavlja grešku modeliranja, a $d(s)$ dejstvo poremećaja na sistem. Uticaj $\Delta W(s)$, promena parametara modela i spoljnih poremećaja na izlaznu promenljivu α može biti modeliran kroz tzv generalisani poremećaj φ .

$$\alpha(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \delta_2(s) + \varphi(s) \quad (9)$$

Do parametara modela $\frac{\alpha(s)}{\delta_2(s)} = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1}$ se dolazi nekom od metoda parametarske identifikacije [7]. Parametarsku identifikaciju ćemo sprovesti nad rezultatima simulacije jediničnog odskočnog odziva originalnog modela OU, u različitim režimima rada vozila (tj. brzinama kretanja, i za $\delta_1=0$). Rezultati su sistematizovani u sledećoj tabeli

Tabela 1. Parametri modela pri različitim brzinama vozila

v	K	T	τ
4.16 m/s	0.51507	0.037778	3.7462e-006
5 m/s	0.54186	0.046559	1.6574e-005
10 m/s	0.78474	0.10422	0.00040225
15 m/s	1.1269	0.15861	0.0012028
20 m/s	1.5074	0.19962	0.0020486
22.22 m/s	1.6761	0.21295	0.0023757

Odnosno,

$$\frac{\alpha(s)}{\delta_2(s)} = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1}, \quad K \in [0.51507, 1.6761], \quad T \in [0.037778, 0.21295], \quad \tau \in [3.75e-006, 0.0023757] \quad (10)$$

može biti zanemareno.

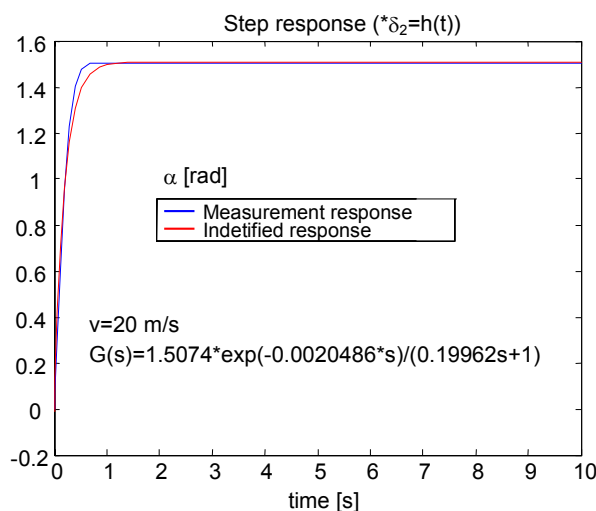
Usvajamo nominalni model objekta upravljanja

$$\frac{\alpha(s)}{\delta_2(s)} = \frac{K_p}{Ts+1} = \frac{1.1}{0.125s+1} \quad (11)$$

Postupak parametarske identifikacije (u smislu najmanjih kvadrata) je verifikovan i ilustrovan na sl. 3.

3. UPRAVLJAČKA STRUKTURA

Svi do sada razvijeni postupci analitičkog projektovanja algoritama upravljanja bazirani su na poznavanju modela objekta upravljanja i apriornih informacija o karakteru poremećaja [4]. U zavisnosti od specifičnosti raspoloživog modela upravljanog procesa, karakteristike klase poremećaja čije se dejstvo na sistem očekuje, postojećih fizičkih ograničenja u sistemu, i primarnih upravljačkih ciljeva, bira se odgovarajući metod strukturne i parametarske sinteze upravljanja [4]. Koncepti unutrašnjih modela u teoriji upravljanja su omogućili da eksplicitno i

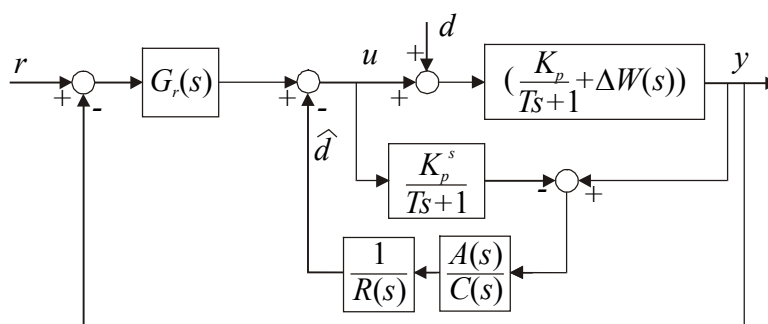


Slika 3. Ilustracija postupka parametarske identifikacije

generalnije nego što je do sada bio slučaj, bude osvojen postupak sinteze upravljačke strukture sistema u smislu kompenzacije određene klase poremećaja, zatim postizanja velikog stepena robustnosti sistema, redukcije podešljivih parametara strukture, itd [4-6].

IMPACT struktura je novijeg datuma i objedinjuje prednosti struktura zasnovanih na IMP (Internal Model Principle) i IMC (Internal Model Control) [5,6]. IMP podrazumeva uvođenje modela generatora poremećaja u upravljačku strukturu sistema radi kompenzacije uticaja zadatog tipa poremećaja na upravljaju promenljivu. IMC struktura nije pogodna za apsorpciju proizvoljne klase spoljnih poremećaja, ali je zato podesna za projektovanje robustne stabilnosti i performanse. Njena bitna karakteristika je da eksplicitno sadrži model objekta upravljanja u paraleli sa realnim objektom.

IMPACT struktura obezbeđuje apsorpciju očekivane klase poremećaja, visok kvalitet dinamičkog ponašanja i izrazitu robustnost u odnosu na promene parametara objekta. Na slici 4, predložena je modifikovana IMPACT struktura u specijalnom slučaju procesa sa odskočnim aperiodskim odzivom i samoizravnanjem. Ideja je da za regulaciju ugla α primenimo IMPACT strukturu koja će imati parametre sa jasnim fizičkim značenjem (važno u slučaju potrebe prepodešavanja strukture).



Slika 4. Modifikovana IMPACT struktura

Da bi se ostvarila željena funkcija prenosa sistema

$$G_{de}(s) = \frac{1}{T_r s + 1} \tag{12}$$

i u cilju izbora minimalnog broja podešljivih parametara strukture čije će promene imati jasan fizički smisao, predlaže se da primarni regulator $G_r(s)$ bude PI regulator oblika

$$G_r(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = \frac{Ts + 1}{K_p T_r s}, \quad \left(K = \frac{T}{K_p T_r}, T_i = T\right) \quad (13)$$

U konkretnom slučaju, s obzirom na vrednosti vremenske konstante T u tabeli 1, izabraćemo da je željena vremenska konstanta konture regulacije $T_r=0.3$ (zbog dobrih robustnih osobina sistema) [4,6].

Unutrašnja kontura doprinosi otklanjanju uticaja poremećaja i robustnosti sistema. Njena sinteza neće ovde biti razmatrana. Preuzimamo rezultat iz [4]

$$\frac{1}{R(s)} \frac{A(s)}{C(s)} = \frac{1}{K_p} \frac{(Ts + 1)((nT_o + L)s + 1)}{(T_o s + 1)^n} \quad (14)$$

koji se odnosi na slučaj sistema sa čistim vremenskim kašnjenjem L

$$G_{de}(s) = \frac{1}{T_r s + 1} e^{-Ls} \quad (15)$$

a omogućava da sistem efikasno apsorbuje uticaj paraboličnih poremećaja u stacionarnom stanju, dok se dinamika apsorpcija i robustna performansa linearno podešavaju izborom vrednosti T_o i n (veće vrednosti znače širu oblast robustne stabilnosti i sporiju dinamiku apsorpcije, i suprotno). U našem slučaju, za parametre unutrašnjeg modela usvajamo:

$$\frac{1}{R(s)} \frac{A(s)}{C(s)} = \frac{1}{K_p} \frac{(Ts + 1)(2T_o s + 1)}{(T_o s + 1)^2} \quad (16)$$

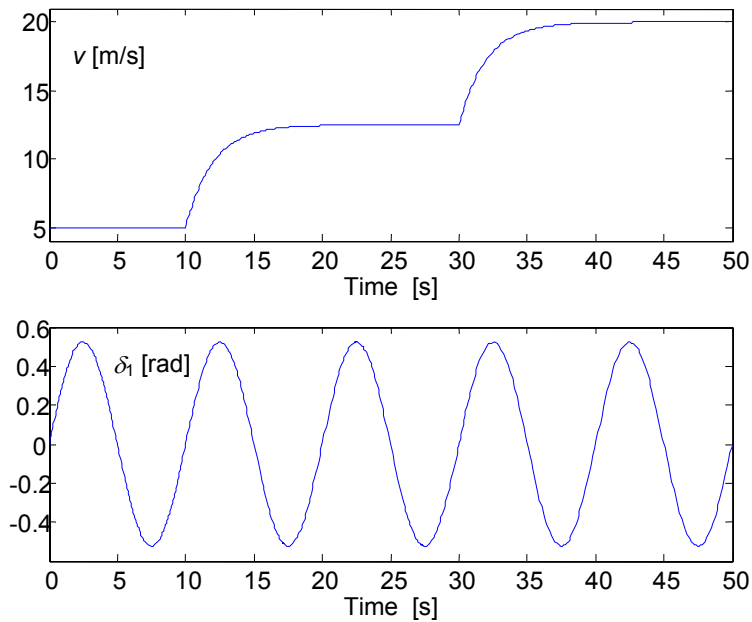
i vremensku konstantu $T_o=0.125$, koja je ista kao i vremenska konstanta nominalnog modela [4,6]. Predložena upravljačka struktura može da potiskuje efekte generalisanog poremećaja koji ima karakter parabole, a balans između robustnosti i efikasnih dinamičkih osobina konture se jednostavno reguliše putem dve vremenske konstante T_r i T_o .

4. REZULTATI SIMULACIJE

Efikasnost upravljačkog koncepta je testirana simulacijom, korišćenjem interaktivnog programskog paketa i njegovog modula prikladnog za ova vid istraživanja. Objekat upravljanja je dat sistemom diferencijalnih jednačina sa promenljivim koeficijentima (1) - (4), a koji se menjaju u skladu sa promenom brzine. Objekat upravljanja ima ulaz δ_1 , koji generiše vozač, a u slučaju simulacije ponašanja sistema to je simetričan test signal oblika

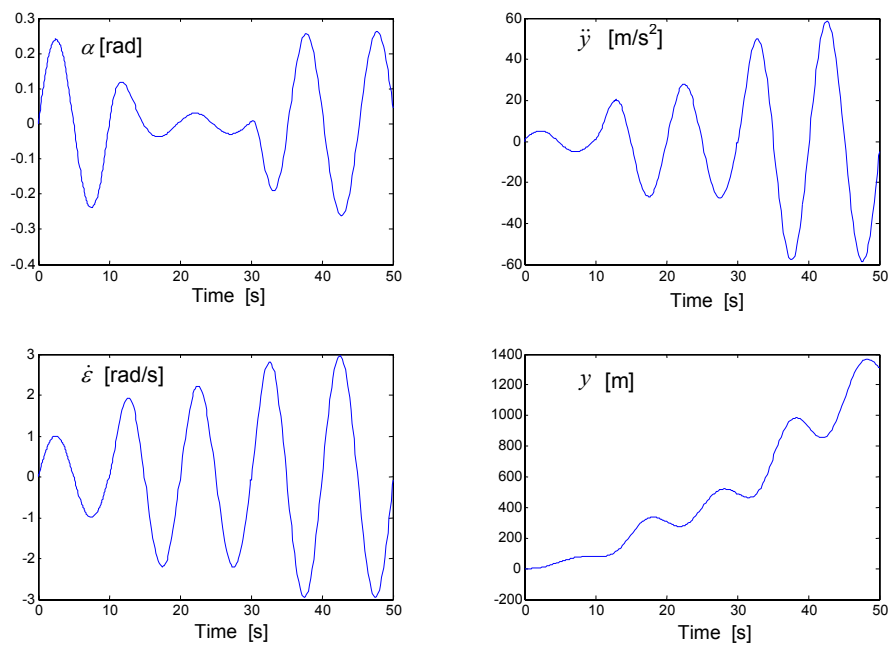
$$\delta_1(t) = \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{2\pi}{100} vt\right) \approx \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{\pi}{5} t\right) \quad (17)$$

zatim, upravljački ulaz δ_2 koji je kontrolisan putem IMPACT strukture i treba da ostvari regulaciju $\alpha=0$, sa efektima direktnog uticaja promene brzine vozila, pri čemu je u simulaciji izabran tipičan signal brzine promenljiv u posmatranom opsegu, kako je to pokazano na sledećoj slici

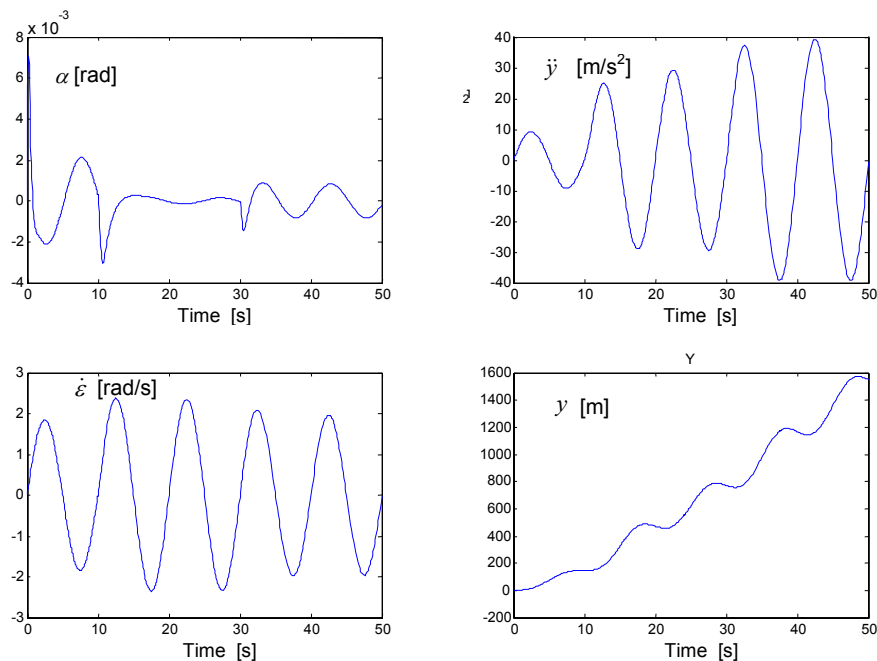


Slika 5. Test signali koji utiču na objekt upravljanja

Za uslove simulacija sa Sl. 5, prilažemo dva rezultata simulacije rada sistema i to kada regulacije nema (Sl. 6), i kada regulacije ima (Sl. 7). Sem direktno upravljane promenljive α , dato je i kretanje drugih promenljivih od interesa



Slika 6. Izlazne promenljive u uslovima kada regulacija ne postoji



Slika 7. Izlazne promenljive u uslovima kada regulacija postoji

Upravljana promenljiva α je praktično svedena na zadatu vrednost $\alpha=0$, bez obzira na intezivne promene parametara objekta upravljanja i dejstva drugih ulaznih signala. Ovim je postignut osnovni cilj regulacije postavljen u ovom radu - da se kompenzacijom vrednosti bočnog klizanja eliminiše nejednoznačnost između ugla zaokretanja točka upravljača, položaja podužne ose vozila, i smera kretanja vozila. Time se stvara baza za analizu dinamike rotacionog kretanja vozila, kao raspregnutog sistema i identifikaciju trenda u odstupanju položaja vozila kao posledica efekata nesimetričnosti odgovora vozila na dejstvo točka upravljača. Primenjeni zakon upravljanja na primarnu upravljaju promenljivu ispoljava određeni sekundarni uticaj na karakteristike nesimetričnosti odgovora vozila, saglasno poredbenoj analizi prikaza na sl. 6 i 7.

Dalji pravac istraživanja biće zasnovan na primeni složenijih upravljačkih koncepata i multivarijabilnih robustnih regulatora kako bi se postigla željena performansa više uzajamnom spregnutih izlaznih promenljivih. Upravljanje zadnjim točkovima jeste stepen slobode koji u funkcionalnom smislu može biti iskorišćen za poboljšanje performansi vozila u pogledu bezbednosti i udobnosti vožnje. Međutim, superiornije varijante predstavljaju kombinaciju ovog koncepta sa konceptom direktnog upravljanja rotacionim kretanjem, kako je istaknuto u prethodnim analizama. Potvrda ovih stavova biće ilustrovana u našim narednim radovima.

5. ZAKLJUČCI

Tehnologija aktivne kontrole radnih funkcija sistema i sklopova motornih vozila pruža nove mogućnosti za zadovoljenje sve strožijih zahteva koji se postavljaju u pravno - tehničkim normativima u domenu bezbednosti kretanja, ekonomičnosti pogona i očuvanju okruženja. Dinamički sistem motornog vozila ima veoma neprikladne karakteristike u konturama bočne dinamike i sa aspekta regulaciono - tehničkih zahteva koji se postavljaju vozaču i sa aspekta projektovanja sistema upravljanja ponašanjem vozila na putu. Savremeni pristupi projektovanja algoritama upravljanja i njihova implementacija u dinamički sistem vozila omogućavaju uspešno rešavanje dva značajna problema, 1/ poboljšanje performansi dinamičkog sistema, 2/ procena posmatranog dinamičkog sistema u pogledu stepena prilagodjenosti njegovih karakteristika regulaciono-tehničkim i psihofiziološkim sposobnostima vozača.

6. LITERATURA

- [1] Radonjić R.: Tehnologija aktivne kontrole u konstrukciji motornog vozila . DEMI 2002, Banja Luka,2002.
- [2] Zhang W.B.: Implementing advanced vehicle control and safety systems for highway maintenance operations. California PATH program, 2003.
- [3] Radonjić R.: Optimum concept of a four-wheel steering system. The seventh symposium MVM 92, Kragujevac,1992.
- [4] Matijević M.S.: "Development of the novel controlling structures for the digitally controlled electrical drives and industrial processes", (in Serbian), *Ph.D. Theses*, Department for Automatic Control, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kragujevac, 2001.
- [5] Ya.Z. Tsytkin and U. Holmberg, "Robust stochastic control using the internal model principle and internal model control" □ *Int. J. Control*, vol. 61, N^o4, P 809-822, 1995.
- [6] Morari M., Zafiriou E., *Robust Process Control*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1989.
- [7] Ljung L.: *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
- [8] Stojić M.R, Matijević M.S, and Draganović L.S.: "A robust Smith predictor modified by internal models for integrating process dead time", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, N^o8, pp. 1293-1298, August 2001.