



UDK: 631.372:669-8

SIMULIRANJE DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA TRAKTORA

Rajko Radonjić

*Mašinski fakultet - Kragujevac
rradonjic@kg.ac.rs*

Sadržaj: Poljoprivredni traktori su projektovani za obavljanje različitih operacija i transportnih zadataka na neuređenim terenima promenljivih svojstava. Kvalitet i bezbednost rada zavise od karakteristika ponašanja traktora zatim iskustva i koncentracije ljudskog operatora. Traktor sa bočno elastičnim gumama, bez manuelne ili automatske kontrole je nestabilno vozilo. Tačnost sleđenja željenih putanja bitno zavisi od krutosti skretanja traktora. U ovom radu razvijen je jedan fizičko-matematički model za proučavanje istaknutih problema. Prikazani su i analizirani ilustrativni primeri simulacionih rezultata.

Ključne reči: *traktor, upravljanje, stabilnost, model, simulacija.*

UVOD

U toku radnog veka poljoprivredni traktori se koriste za različite radne operacije i transportne zadatke na terenima različite konfiguracije, promenljivih svojstava tla zavisno od vremenskih uslova, pri različitim brzinama kretanja. Pri tome, vozač obavlja složene radne zadatke upravljanja traktorom, nadgledanja i kontrole operacija radnih mašina, priključnih orudja ili vozila. Zavisno od konkretnog zadatka, traktor kao radno vozilo, vuče ili/i potiskuje radna orudja, zbog čega vozač-operator, saglasno položaju i rasporedu priključaka, mora u pojedinim vremenskim intervalima obavljati odvojeno, sa prekidima, funkcije upravljanja traktorom i kontrole rada orudja. Ova neusaglašenost funkcija dovodi do bržeg zamaranja vozača, povećanog rizika pojave udesa pri radu, većih gubitaka žitarica i drugih prinosa sa parcela, degradacije tla i slično.

Polazeći od činjenice da je upravljanje traktorom za vreme obavljanja radnih operacija najbitnija aktivnost u izvršenju kompletnog zadatka nadgledanja i kontrole, nije teško objasniti razloge zašto se o ideji automatskog vođenja traktora počelo razmišljati još na početku druge polovine prošlog veka [1], [2]. U proteklom periodu razvijeni su, u tu svrhu, različiti sistemi : mehanički, optički, radio, ultrazvučni, sa referentnim kablovima. Pri tome, u poslednje nepune tri decenije razvoju sistema za

automatsko vođenje poljoprivrednih traktora, bitno su doprinele nove tehnologije opto-elektronskih, inerciono-navigacionih i globalno pozicionih senzora, [3]. Vodeći svetski proizvođači traktora i samohodnih poljoprivrednih mašina u svoje nove modele u sve većem stepenu implementiraju savremene module aktivne kopntrole radnih procesa i režima kretanja, [4].

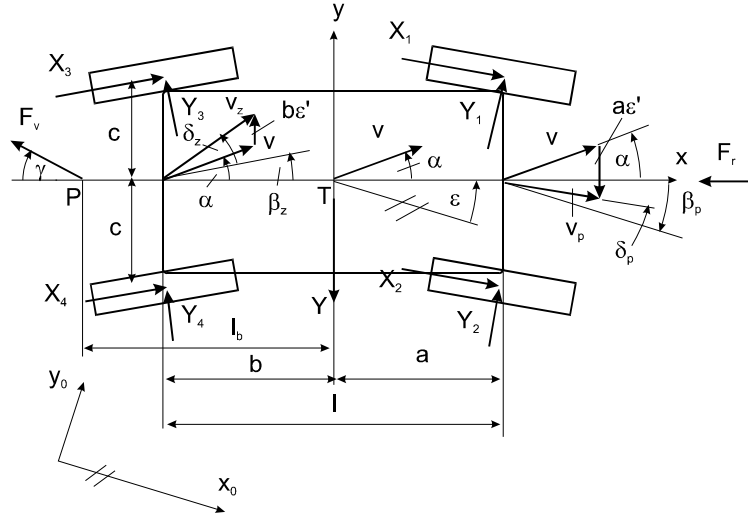
Nezavisno od cilja koji se postavlja i tehnologije upravljanja koja će biti korišćena, prvi korak pri rešavanju ovih problema je specificiranje dinamičkih karakteristika traktora, na bazi istraživanja interakcije vitalnih sklopova i sistema relevantnih za obavljanje određenih radnih zadataka. Naime, treba poznavati mehaničke i funkcionalne sprege koje u strukturi traktora i priključnih oruđa mogu biti realizovane na različite načine, zavisno od korišćenog koncepta. Tako na primer, u pogledu oslanjanja – traktori bez elastičnog oslanjanja, sa elastičnim oslanjanjem kabine, sa elastičnim oslanjanjem samo jedne osovine, sa elastičnim oslanjanjem obe osovine. U pogledu upravljanja – upravljanje prednjim, zadnjim, prednjim i zadnjim točkovima, zglobnim ramom, preko sistema kočenja. U pogledu vuče – pogonski most na jednoj osovini, pogonski most na obe osovine. U pogledu kočenja – kočenje svim točkovima, kočenje točkovima jedne osovine, kočenje pojedinačnim točkovima. Ako se ovim osnovnim funkcijama traktora dodaju i njegove moguće radne funkcije u sprezi sa radnim oruđima i priključcima onda se znatno povećava broj opcija specificiranih dinamičkih karakteristika i potreban obim istraživanja za njihovu identifikaciju.

U rezultatu istraživanja kompleksnih struktura i procesa treba odrediti karakteristike ponašanja sistema pri kretanju i radu sa aspekta odstupanja od referentnih putanja i pravaca, kao i njegovu reakciju pri korigovanju tog odstupanja. Za slučaj manualnog upravljanja traktorom ovi pokazatelji su mera uspešnosti rada i zamaranja vozača, a za slučaj automatskog vođenja su baza za izbor koncepta sistema upravljanja, kao i optimiranja njegove strukture i parametara.

Shvatajući značaj predmetne problematike, u ovom radu su razmotrene mogućnosti primene savremenih metoda simulacije dinamičkih karakteristika traktora u pogledu upravljanja i stabilnosti kretanja kao baza za projektovanje automatskih sistema vođenja, ali i podrška globalnih pozicionih i navigacionih sistema u smislu verifikacije rezultata i identifikacije ulaznih podataka za simulacione modele. Pristup, model i karakteristični rezultati su prezentirani u narednim poglavljima ovog rada.

MODEL ZA SIMULACIJU DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA TRAKTORA

Saglasno ranijim istraživanjima odnosa ponašanja drumskih vozila, [5], [6], formiran je na sl. 1., ekvivalentni ravanski model poljoprivrednog traktora, čija se struktura može prilagoditi različitim konceptima traktora, pre svega izvedbama prenosnika snage i sistema za upravljanje. Struktura i parametri modela na sl. 1, odgovaraju opštem slučaju pogona i upravljanja na svim točkovima, i kao takav, definiše baznu varijantu, iz koje se mogu izdvojiti posebno specificirani slučajevi. Efekti raspodele opterećenja po točkovima obuhvaćeni su kompleksnim relacijama komponenata sila, iskazane parametarski u funkciji podužnog klizanja i ugla skretanja pneumatika. Moduli sistema za upravljanje prednjih i zadnjih točkova, mogu se uključiti pojedinačno ili spregnuto. Broj mogućih racionalnih opcija je različit i predstavlja poseban interes ovih istraživanja.



Sl. 1. Model traktora sa pogonom i upravljanjem na svim točkovima

Potrebne relacije za analizu funkcija upravljanja i pogona traktora preko svih točkova dobijaju se iz uslova dinamičke ravnoteže, saglasno modelu na sl. 1, za opšti slučaj krivolinijskog kretanja, u sledećem obliku:

$$I\ddot{\varepsilon} - Y_1(a + c \sin \beta_p) - Y_2(a - c \sin \beta_p) + Y_3(b + c \sin \beta_z) + Y_4(b - c \sin \beta_z) \mp X_1(c - a \sin \beta_p) \pm X_2(c + a \sin \beta_p) \mp X_3(c - b \sin \beta_z) \pm X_4(c + b \sin \beta_z) + F_v l_b \sin \gamma = 0 \quad (1)$$

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + (Y_1 + Y_2) \sin \beta_p - (Y_3 + Y_4) \sin \beta_z - F_r - F_v = 0 \quad (2)$$

$$mv(\dot{\alpha} + \dot{\varepsilon}) - (Y_1 + Y_2) - (Y_3 + Y_4) \pm (X_1 + X_2) \sin \beta_p \pm (X_3 + X_4) \sin \beta_z - F_v \sin \gamma = 0 \quad (3)$$

$$\delta_p = \beta_p - \alpha - \dot{\varepsilon}(a/v) \quad \delta_z = \beta_z - \alpha + \dot{\varepsilon}(b/v) \quad (4)$$

$$Y = f_y(X)K_\delta \delta \quad f_y(X) = 1 \pm C_y X \quad (5)$$

Prema datom redosledu, gornje zavisnosti prikazuju : (1) - ravnotežu momenata oko vertikalne težišne ose traktora, (2) - ravnotežu sila u pravcu podužne ose traktora, (3) - ravnotežu sila u pravcu poprečne ose traktora, (4) - rezultujuće uglove skretanja prednje i zadnje osovine traktora, respektivno, (5) - funkcionalnu zavisnost bočne sile na pneumaticima od podužne sile i ugla skretanja. Prema oznakama na sl. 1, generalisane koordinate, x, ε, α , definišu položaj traktora u ravni $x_0, 0, y_0$. Uglovi zaokretanja prednjih i zadnjih točkova traktora, označeni su sa, β_p, β_z , respektivno. Uglovi skretanja prednje i zadnje osovine traktora, δ_p, δ_z , izraženi su preko, tako zvane ugaone brzine plivanja, $d\alpha/dt$ i ugaone brzine zaokretanja traktora oko vertikalne ose, $d\varepsilon/dt$, zatim uglova zaokretanja upravljačkih točkova, brzine kretanja v i koordinata centra masa, a, b . Sila na poteznici traktora, F_v , deluje pod uglom γ , u odnosu na podužnu osu traktora i na rastojanju l_p , od centra masa T . U diferencijalnim jednačinama kretanja, (1) do (3) i izrazu (5), uočava se sprega bočnih, Y_i i podužnih, X_i reakcija sila na pneumaticima koja iskazuje kompleksnu interakciju posmatranih sistema traktora, a takođe traktora i tla.

Ključno pitanje u ovim istraživanjima je izbor parametara submodela pneumatika, (5). U tom smislu koristili smo neka iskustva u vezi identifikacije relacija, bočna sila - podužna sila - ugao skretanja - klizanje, pneumatika za drumska vozila, [7], uz određene modifikacije s obzirom na specifičnosti interakcije pneumatika traktora sa deformabilnim tlom, [5], [8].

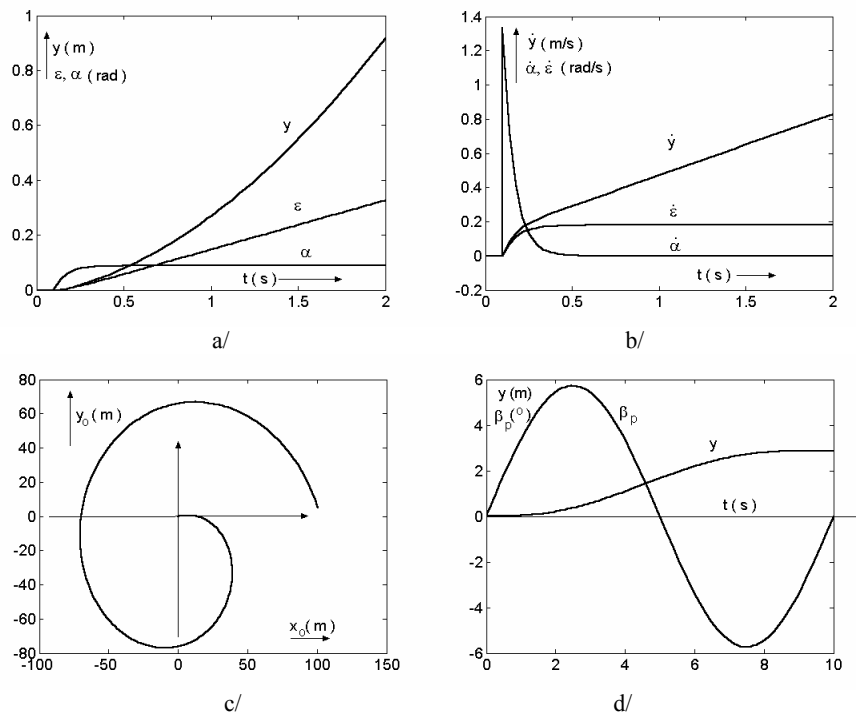
REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Rezultati simulacije dinamičkih karakteristika traktora prikazani su na sl. 2 i sl. 3. Međutim, pre analize konkretnih rezultata treba istaći neke specifičnosti posmatranog problema a time i formiranog modela. Kao što je naglašeno, pri modeliranju dinamike traktora, uzet je u obzir uticaj elastičnosti pneumatika točkova u podužnom i bočnom pravcu u odnosu na ravan točka. Za proces upravljanja traktorom od posebnog značaja su parametri bočne elastičnosti pneumatika. Dejstvo horizontalnih sila na traktor i točkove sa bočno elastičnim pneumaticima, u pravcu upravnom na podužnu ravan, izaziva skretanje pneumatika, dakle, odstupanje pravca kretanja točka od njegove podužne ravni za ugao skretanja. Prema tome, dok je kod traktora sa bočno krutim točkovima, za zadat zakon zaokretanja upravljača i brzinu, kretanje kinematski potpuno određeno i može se lako izračunati odgovarajuća putanja, kod traktora sa bočno elastičnim točkovima to nije slučaj. To znači, da će u realnim uslovima kretanja, pri postojanju skretanja pneumatika, pravac kretanja točkova a time i traktora zavisiti od dinamičkih sila koje dejstvuju na njega – problem se rešava metodama dinamike i znatno se usložava sa pojavom klizanja i složene interakcije podsistema, deformabilan točak/deformabilno tlo. Ovi fenomeni elastičnih pneumatika pokazuju znatan uticaj na upravljivost i stabilnost kretanja traktora, dakle, kao što je već istaknuto u uvodnom delu rada, na tačnost vođenja radnog sistema, bezbednost rada, produktivnost itd. Neki od ovih efekata su ilustrovani rezultatima simulacije, na priloženim graficima.

Grafički prikazi na sl. 2, a, b, c, odnose se na slučaj kretanja traktora mase 3000 kg, međuosnog rastojanja 2.2m, brzinom 8.2 km/h, na horizontalnom tvrdom tlu, pri naglom zaokretanju prednjih upravljačkih točkova za ugao 12° , i odnosu bočne krutosti prednjih i zadnjih točkova, iskazanom parametrom otpora skretanja 1: 1.25. Kao što se sa prikaza vidi, nakon prelaznog procesa, bočno pomeranje centra masa traktora, y , menja se po zakonu parabole i nakon 2 sekunde od poremećaja dostiže vrednost 0.92m, ugaonost skretanja traktora oko vertikalne ose, ε , kao ugao između podužne ose traktora i referentnog pravca menja se približno linearno i nakon 2 sekunde dostiže vrednost od 0.32 radiana, a ugao između podužne ose traktora i vektora brzine kretanja, tako zvani ugao plivanja, α , posle prelaznog procesa zadržava konstantnu vrednost od 0.97 radijana. Odgovarajuće brzine, kao vremenski izvodi ovih veličina date su desno, na sl. 2b. Putanja, koju opisuje centar masa traktora, prikazana na slici 2c, u inercionom koordinatnom sistemu x_0 y_0 , odstupa bitno od kruga i ukazuje na nestabilan režim kretanja, za ovu kombinaciju parametara i uslova kretanja traktora.

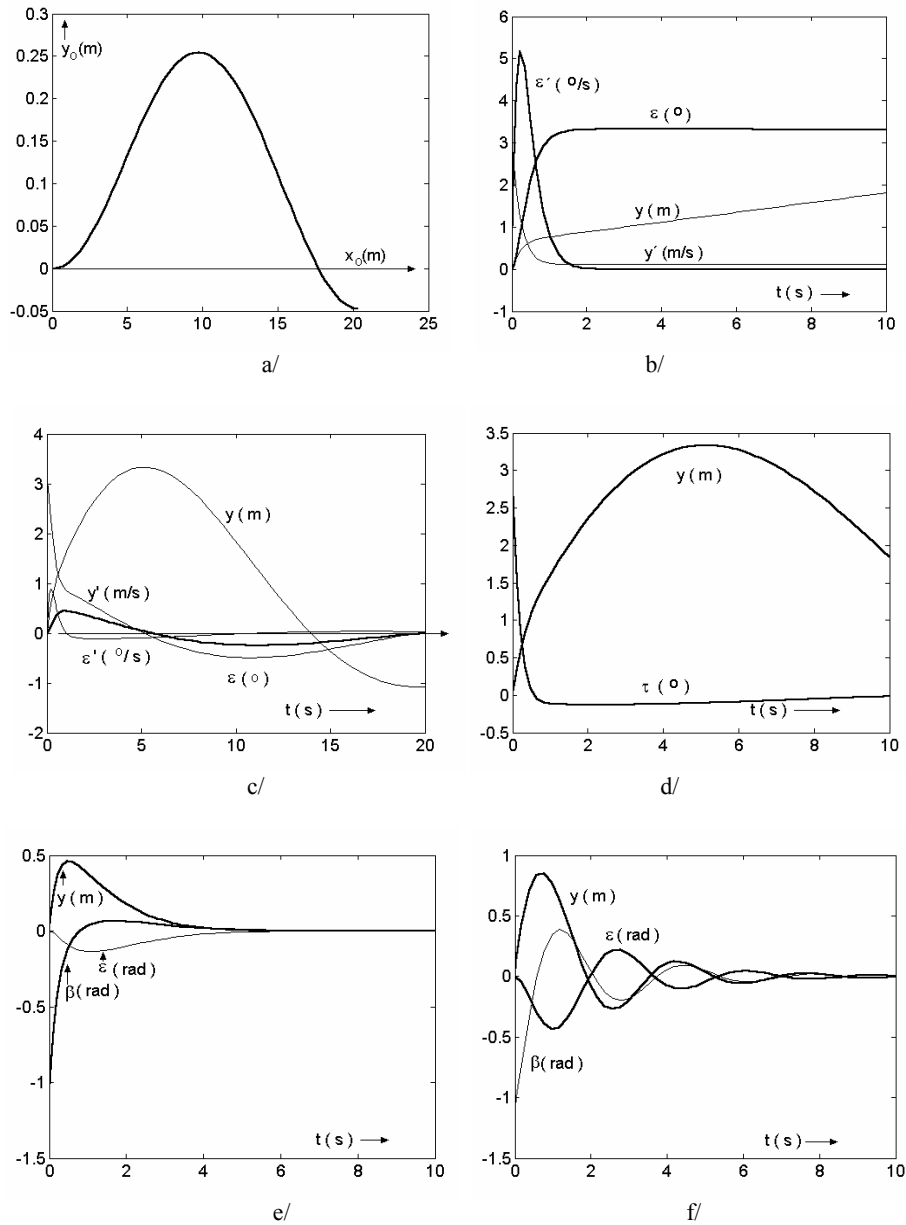
Takođe je ilustrativan primer sopstvene nestabilnosti traktora, prikazan na sl. 2 d, za slučaj simetričnog zaokretanja prednjih upravljačkih točkova po zakonu sinusa, amplitude 9° i učestanosti 0.1Hz. Kao što se vidi, nakon jednog kompletnog ciklusa

zaokretanja točkova, levi – desni zaokret, centar masa traktora se ne vraća u početni pravolinijski položaj već, u odnosu na njega odstupa 2.7m, nakon 10 sekundi kretanja. Ovom režimu kretanja odgovara nesimetrična putanja u inercionom koordinatnom sistemu na sl. 3a, koja takođe potvrđuje nestabilno kretanje. Istu tendenciju ispoljava ova simulaciona varijanta traktorai pri impulsnoj pobudi na volanu pa ovi rezultati nisu prezentirani.



Sl.2. Rezultati simulacije dinamičkih karakteristika traktora. a/, b/, c/ slučaj naglog zaokretanja točka upravljača, d/ slučaj zaokretanja točka upravljača po sinusnoj funkciji (Detaljnije objašnjenje u tekstu rada)

Grafici na sl. 3b, prikazuju dinamičke karakteristike traktora, pri pravolinijskoj vožnji, fiksiranim upravljačkim točkovima, i impulsnoj bočnoj pobudi. Nakon prelaznog procesa, uagona, $d\varepsilon/dt$ i bočna translatorna, dz/dt brzina se vraćaju na nulte vrednosti, podužna osa traktora zauzme konstantan ugaoni položaj od $\varepsilon=3.3^\circ$, što dovodi do linearnog porasta bočnog odstupanja centra masa traktora, koje na kraju 10 sekunde dostiže vrednost od $y=1.87\text{m}$. Ovaj slučaj je iskorišćen da se prikaže mogućnost simulacije regulacionog dejstva vozača u smislu stabilizacije kretanja traktora, anuliranjem bočnog odstupanja, rezultati na sl. 3 c,d, za dva različita nivoa tačnosti vođenja, kao i za projektovanje optimalnog regulatora, za sistem automatskog vođenja, na sl. 3 e,f, za dve brzine kretanja.



Sl. 3. Rezultati simulacije dinamičkih karakteristika traktora sa varijantama upravljanja i stabilizacije poremećenog kretanja. a/, b/ generalisane koordinate kretanja traktora, c/, d/ pokazatelji ručnog upravljanja, e/, f/ pokazatelji automatskog upravljanja

ZAKLJUČAK

Sve strožiji zahtevi za bezbedan i udoban rad ljudskog operatora, povećanje produktivnosti, zaštite tla i okruženja pri obavljanju poljoprivrednih operacija dovode do masovnije primene tehnologije aktivne kontrole u konstrukcijama traktora i priključnih mašina kao i njihove integracije sa globalno-pozicionim i inerciono-navigacionim sistemima. Pri tome, savremene metode modeliranja i simulacije dinamičkih sistema daju značajan doprinos rešavanju ovih problema.

LITERATURA

- [1] Richey B.: Automatic pilot for farm tractors. *Agricultural Engineering*, 40 (2), 78-79, 1959.
- [2] Sohne W.: *Agricultural Engineering and Terramechanics*. Journal of Terramechanics. vol. 6, N^o 4, 1969.
- [3] Noboru N, et al: Vehicle automation system based on multi-sensor integration. ASDE Paper 983111.
- [4] CLAAS, FENDT, prospekti materijal, 2008, 2009.
- [5] Wong J.: *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons, Newyork, 1995.
- [6] Radonjić R., Radonjić D.: *Projektovanje sistema za upravljanje traktora s obzirom na upravljačko dejstvo vozača*. Traktori i pogonske mašine, br.4, Novi Sad, 1998.
- [7] Siefkes T.: *Flachbahnprufstand II. Eine Versuchseihheit zur Ermittlung der Eigenschaften von Nutzfahrzeugreifen und -achsen*. ATZ 95(1993) 6, 306-313.
- [8] Bekker M.: *Introduction to terrain-vehicle systems*. Ann Arbor. The university of Michigan press, 1960.

SIMULATION OF THE TRACTOR DYNAMICAL CHARACTERISTICS

Rajko Radonjić

Mechanical Faculty - Kragujevac
rradonjic@kg.ac.rs

Abstract: Agricultural tractors are design to perform various operation and transport tasks on unprepared and changing terrain. The work quality and safety are depended from tractor handling characteristics and from human operator skill and concentration. An agricultural tractor with lateral flexible tyre, without manual or automatic control is an unstable vehicle. The following accuracy of the desired trajectory is strongly affected of the tractor cornering stiffness. In this paper a physical-mathematical model was developed to study above mentioned problems. Illustrative examples of simulation results are presented and analysed.

Key words: tractor, control, stability, model, simulation.