

UDK: 631.372:669-8

*Originalni naučni rad
Original scientific paper*

UTICAJ KARAKTERISTIKA TERENA NA OSCILACIJE TRAKTORA

Rajko Radonjić*, Aleksandra Janković, Branislav Aleksandrović

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Sažetak: U ovom radu su razmotreni problemi oscilacija traktora prouzrokovane neravninama terena. Za simulaciona istraživanja razvijen je modularni model traktorskog sistema. Eksperimentalna platforma je korišćena za merenje oscilatornih parametara guma, krutosti i prigušenja, koji su potrebni za simulaciona istraživanja. Kao ilustrativni primeri prikazani su i diskutovani eksperimentalni rezultati karakteristika guma i simulirani rezultati oscilacija traktora za dva stanja opterećenja i tri oblika pobude od terena.

Ključne reči: *teren, neravnine, traktor, gume, merenja, oscilacije, simulacija.*

UVOD

Pri obavljanju poljoprivrednih operacija ili transportnih zadataka traktor se spreže sa odgovarajućim radnim mašinama ili transportnim sredstvima i pri tome se kreće na terenima različitog mikro i makro reljefa. Pri tome, kao rezultat interakcije traktorskog sistema i tla generiraju se oscilatorni procesi koji utiču na, radnu efikasnost sistema, opterećenje ljudskog operatora, sabijanje i degradaciju tla. Intenzitet ovih procesa zavisi od, karakteristika pobude tla, konstruktivnih i eksploatacionih karakteristika traktora i implemenata, načina dejstva operatora na komande za upravljanje. Ovi uticajni faktori su u dosadašnjim radovima na različite načine obuhvaćeni i analizirani.

U radu [1], autori razmatraju dva vida statističkih karakteristika dejstva neravnina tla na traktor. Prvi vid dejstva, kao pobuda oscilacija, odnosi se na jednu parcelu, čije karakteristike su prikazane u obliku stacionarnih slučajnih funkcija. No, kako isti traktorski sistem može obavljati poljoprivredne operacije na različitim parcelama, odnosno, u različitim terensko-klimatskim zonama, autori definišu i drugi vid statističkih karakteristika. Naime, iz vremenskih zapisa pobudnog dejstva pojedinih parcela, kao stacionarnih slučajnih funkcija, određuju statističke karakteristike, kao pojedinačne

* Kontakt autor. E-mail: rradonjic@kg.ac.rs

parametre, na primer srednje vrednosti, i kao funkcije, na primer autokorelacione funkcije i gustine spektara snage. A zatim prate promene ovih parametara i funkcija od parcele do parcele i tako formiraju bazu podataka o uslovima rada posmatranog traktorskog sistema.

Analitička interpretacija pobudnog dejstva terena na traktor sa implementom prezentirana je u radu [2]. Autor koristi iskustva stečena u domenu identifikacije dejstva neravnina puta na automobil. Pri tome koristi istu strukturu identifikacionog modela za gustinu spektra snage neravnina karakterističnih parcela u funkciji prostorne učestanosti. Linearni i eksponencijalni koeficijenti modela pobude određeni za dve karakteristične parcele, pašnjak i poorana njiva, ukazuju na značajne razlike pobudnog dejstva savremenih puteva i terena u pogledu intenziteta i učestanosti. Razlika u prirodi pobude puta i terena se odražava i na kompleksnost simuliranja oscilatornih procesa drumskih i terenskih vozila. Naime, gustina spektra snage prvog izvoda funkcije pobude savremenih puteva je približno konstantnog nivoa, dakle, tipa "belog šuma", što u značajnoj meri olakšava sintetizovanje pobudnih spektara za konkretne uslove. Za pobudna dejstva terena to nije slučaj, zbog čega su simulaciona istraživanja terenskih vozila nešto kompleksnija. Zbog svoje kompleksne, višenamenske funkcije poljoprivredni traktor se, u toku radnog veka kreće i u jednim i u drugim uslovima, određenim redosledom i sa određenom vremenskom raspodelom.

Nakon 70-tih godina prošlog veka broj radova iz domena identifikacije i sintetizovanja pobudnog dejstva terena na oscilatorne procese traktorskih sistema se povećava, [3] [4]. U rezultatu toga, kao i u domenu drumskih vozila [5], predloženi su i usvojeni normativi za ocenu i klasifikaciju terena sa aspekta njihovog pobudnog dejstva, [6].

Radovi iz, gore pomenutog, drugog segmenta istraživanja se bave pitanjima formiranja fizičko-matematičkih i simulacionih modela oscilatornih procesa traktora i sistema u smislu proučavanja određenih uticaja, fenomena, ali i optimiranja vitalnih podsklopova i sistema, dakle, njihovih konstruktivno-eksploatacionih karakteristika, kao i zahteva i uslova za uvođenje komponenata tehnologije aktivne kontrole i GPS, INS, podrške.

Jedna metoda ispitivanja oscilatornih procesa poljoprivrednih mašina, sa kompletnim elastičnim oslanjanjem, osnovno i dopunsko i nelinearnim elastičnim i prigušnim karakteristikama, prikazana je u radu [7]. Formiran je ravanski, dvo-dimenzionalni model traktora, pobudno dejstvo od tla je aproksimirano korelacionom funkcijom sa diferencijabilnim svojstvima. Kao rezultati istraživanja, prezentirani su pokazatelji oscilatorne udobnosti traktora u funkciji relevantnih parametara i brzine kretanja, za četiri karakteristična moda oscilovanja. Struktura i parametri korišćenog modela, omogućili su poređenje deformacija pneumatika - guma traktora kao osnovnog elastičnog oslanjanja i metalnih opruga, kao elemenata dopunskog elastičnog oslanjanja i njihov uticaj na pokazateljke komfora.

Značaj simulacionih istraživanja u cilju optimiranja elastičnog oslanjanja traktora, sa i bez dopunskog elastičnog oslanjanja, istaknut je u radu [8]. Za datu gustinu spektra neravnina tla, određene su optimalne vrednosti krutosti i prigušenja dopunskog elastičnog oslanjanja, po kriterijumu minimiziranja vertikalnih ubrzanja u izabranim tačkama, uz dopunski uslov ograničenja relativnog hoda oslanjanja.

Intenzivan razvoj traktora i poljoprivrednih mašina prati stalni trend porasta brzine kretanja, koja ispoljava efekte na oscilatornu udobnost, oscilatornu bezbednost,

opterećenje sistema, operatora i tla, [9]. U tom smislu, kompletno elastično oslanjanje traktora postaje sve aktuelnije. Može se reći da trend uvođenja savremenih sistema elastičnog oslanjanja traktora, zatim pogona na obe osovine, upravljanja preko svih točkova, ne prati adekvatan razvoj simulacionih modela i eksperimentalnih sistema. U ovom smislu treba istaći neke aktuelne probleme, čije rešavanje bi doprinelo u pomenutim segmentima istraživanja. Pre svega, formiranje kompleksnih simulacionih modela traktorskih sistema, koji bi adekvatnije obuhvatili nelinearna svojstva sistema dopunskog elastičnog oslanjanja i pneumatika, interakciju kretača, točkova i tla; zatim, kompletnost i raspoloživost baza eksperimentalnih podataka o ispitivanjima traktora, agregata i komponenata. Ovi podaci su polaz za kreiranje adekvatnih i racionalnih simulacionih modela i njihovu verifikaciju. U ovu grupu aktuelnih problema razvoja i korišćenja savremenih traktora treba dodati i potrebu efikasnije identifikacije i razumevanja nepoželjnih fenomena koji nastaju pri uvođenju novih koncepata vitalnih sklopova i njihove interakcije, [10]. Na primer, interakcija SEO i 4WD, kao power hop efekat nestabilnosti traktorskog sistema itd.

Uvidom u dosadašnje relevantne radove iz domena oscilatorne dinamike traktora i priključaka, može se zaključiti da je najviše pažnje posvećeno konceptu traktora sa osnovnim elastičnim oslanjanjem preko pneumatika, [11], [12]. Pri tome je glavni problem bio u fazi projektovanja, kako optimirati karakteristike pneumatika i sa aspekta oscilatornih procesa s obzirom na njihovu višenamensku ulogu. Ovo delikatno pitanje je predmet saradnje proizvođača traktora, mašina i guma. Logično je da proizvođači guma, kao komponenata traktora, sprovode određena ispitivanja u određenim uslovima i prema odgovarajućim normativima. Takođe je logično i da proizvođači traktora, kao finalnog proizvoda, obavljaju određena ispitivanja vezana za mehaničke i funkcionalne sprege agregata i njihov uticaj na zahtevane performanse. Retki su, međutim, radovi u kojima se prezentiraju rezultati ispitivanja interakcije traktora, guma i tla u realnim uslovima sa aspekta oscilatornih svojstava, tj. parametara krutosti i prigušenja, [13], [14], [15], [16]. Svakako, da je za ove kompleksne uslove rada traktorskog sistema teško dati egzaktnu matematičku formulaciju modela pneumatika u pogledu njegovih elasto-prigušnih, tj. oscilatornih svojstava. Sa druge strane i suviše kompleksni simulacioni modeli i na bazi njih dobijeni rezultati često nisu prikladni za konkretnu upotrebu, posebno u slučajevima kada treba optimalno izabrati i podesiti eksploatacione parametre sistema. Ovde se pre svega misli, na brzinu kretanja, vrstu pneumatika, pritiske u njima, raspodelu balasta, izbor i sprezanje implemenata itd.

U smislu rešavanja nekih od pomenutih problema u ovom radu je korišćena jedna metoda modularnog modeliranja traktorskog sistema integracijom modula bazne dinamike sa modulima vitalnih sistema oslanjanja, pogona, upravljanja, vuče. U narednim poglavljima dat je kratak prikaz predložene metode i neki dobijeni rezultati.

MATERIJAL I METODE RADA

Na osnovu sprovedenih analiza i datih zaključaka u uvodnom delu rada, u ovom poglavlju biće sažeto prikazan predmet rada i korišćena metodologija. Pri tome, prvi segment se odnosi na pitanja formiranja odgovarajućih modela za simulaciona istraživanja. U drugom segmentu prikazan je eksperimentalni sistem koji se koristi za

identifikaciju parametara i karakteristika modula traktorskih sistema uključenih u strukturu simulacionih modela.

Pri formiranju fizičko-matematičkih modela za potrebe istraživanja u ovom radu, pošlo se od prikaza datih na Sl. 1a, b, c. Slika 1a, prikazuje izgled tri od brojnih koncepata poljoprivrednih traktora koji mogu biti predmet ovih istraživanja. Na Sl. 1b, prikazana je jedna od faza modeliranja traktora, koji za razliku od klasičnog koncepta oslanjanja traktora samo preko elastičnih guma, poseduje dopunsko elastično oslanjanje prednje osovine preko metalnih opruga i viskoznih amortizera. Date oznake na slici imaju sledeća značenja: l – međuosno rastojanje, a, b, h – koordinate centra masa, c_1, k_1 – elasto – prigušni parametri dopunskog elastičnog oslanjanja prednje osovine, c_{1p}, k_{1p} – elasto – prigušni parametri prednjih guma, c_{2p}, k_{2p} – elasto-prigušni parametri zadnjih guma, $h(x)$ – izvorna funkcija neravnina podužnog profila tla, $z_o(x)$ – ekvivalentna funkcija neravnina podužnog profila tla, dobijena filtriranjem izvorne funkcije posredstvom modula H_1 i H_2 , koji uključuju efekte interakcije podsistema, guma – tlo. U cilju uopštavanja procedura modeliranja i simuliranja na Sl. 1c, je prikazan kompletan oscilatorni model traktora, sa dopunskim elastičnim oslanjanjem obe osovine. Osnovne oznake imaju isto značenje kao i na Sl. 1b, ali su uvedene dopunske oznake modula, M_{1p} – prednjih guma, M_{2p} – zadnjih guma, M_{1s} – dopunskog elastičnog oslanjanja prednje osovine, M_{2s} – dopunskog elastičnog oslanjanja zadnje osovine, pri tome su u svakom od ovih modula specificirane oznake parametara elastičnosti c_i i prigušenja k_i , gde je, i – opšta oznaka indeksa. Osim toga, na Sl. 1c, su date oznake oslonjene mase traktora, m , odgovarajućeg momenta inercije oko poprečne ose traktora, I , zatim neoslonjene mase, m_1, m_2 , koordinate karakterističnih tačaka, l_s i l_c , pravac i smer brzine kretanja, v , priključne tačke zadnjeg implementa Z_i , prednjeg implementa, P_i .

U opštem slučaju razmatranja, model prikazan na Sl. 1c, poseduje pet stepeni slobode kretanja i to:

- dva stepena slobode elastično oslonjene mase, m , oznake alternativa, $z \rightarrow \theta$, vertikalno i ugaono pomeranje oslonjene mase, ili $z_1 \rightarrow z_2$, vertikalno pomeranje prednjeg i zadnjeg dela oslonjene mase, respektivno,
- zatim po jedan stepen slobode kretanja neoslonjenih masa, m_1, m_2 , dakle, njihova vertikalna pomeranja, z_1, z_2 , respektivno,
- i na kraju, jedan stepen slobode osnovnog, podužnog kretanja traktora u pravcu koordinate, x , brzinom, v .

Diferencijalne jednačine kretanja, dobijaju se na osnovu fizičkog modela prikazanog na Sl. 1c, čija se struktura i parametri prilagođavaju konkretnom konceptu razmatranog traktora. Pri tome se posmatraju uslovi dinamičke ravnoteže sila i momenata koji dejstvuju u odnosu na položaj statičke ravnoteže.

Treba napomenuti da modularni prikaz strukture opšteg oscilatornog modela na Sl. 1c, olakšava proceduru formiranja odgovarajućih matematičkih modela, kao baze za kreiranje simulacionih programa. Naime, uslovi dinamičke ravnoteže se posmatraju sa uključenim modulima osnovne, vertikalno – podužne dinamike, zatim modulima elasto-prigušnih karakteristika osnovnog i dopunskog sistema elastičnog oslanjanja, sa oznakama na Sl. 1c, koje su u prethodnom tekstu objašnjene, i na kraju, modulima interakcije guma i kolovoza, H_1, H_2 , čije je fizičko značenje, takođe, prethodno dato. Dakle, reč je o integraciji spomenutih modula, kojom se u opštem slučaju olakšava formiranje fizičkih i matematičkih modela. Međutim, ovim pristupom se takođe

uprošćava eksperimentalni sistem i metode identifikacije neophodnih ulaznih podataka u simulacione proračune, efikasnije koriste dobijeni eksperimentalni podaci kao i raspoložive baze podataka. I na kraju, a što je veoma bitno, racionalno se kreiraju i koriste simulacioni programi, i sa aspekta vremena neophodnog za sve faze konvencionalnog postupka modeliranje - simuliranje i sa aspekta broja variranja uticajnih faktora i uključivanja teško merljivih, nemerljivih ili nepoznatih fenomena.

U skladu sa datim napomenama, određeni su uslovi dinamičke ravnoteže i to dva (1), (2), za oslonjenu masu m , po jedan (3), (4), za svaku neoslonjenu masu, m_1 , m_2 i jedan, za osnovno, podužno kretanje, brzinom v (6).

$$m\ddot{z} + F_{ck1} + F_{ck2} = 0 \quad (1)$$

gde su:

- m [kg] - oslonjena masa traktora,
- \ddot{z} [$m \cdot s^{-2}$] - vertikalno ubrzanje centra oslonjene mase traktora,
- F_{ck1} [N] - rezultanta sila elastičnih i prigušnih elemenata dopunskog oslanjanja prednje osovine,
- F_{ck2} [N] - rezultanta sila elastičnih i prigušnih elemenata dopunskog oslanjanja zadnje osovine.

$$-I\ddot{\theta} - F_{ck1}a + F_{ck2}b = 0 \quad (2)$$

gde su:

- I [$kg \cdot m^2$] - moment inercije oslonjene mase oko poprečne ose traktora,
- $\ddot{\theta}$ [$rad \cdot s^{-2}$] - ugaono ubrzanje oslonjene mase oko poprečne ose traktora,
- a, b [m] - koordinate centra oslonjene mase traktora.

$$m_1\ddot{z}_{11} - F_{ck1} + F_{pck1} = 0 \quad (3)$$

gde su:

- m_1 [kg] - neoslonjena masa prednje osovine,
- \ddot{z}_{11} [$m \cdot s^{-2}$] - vertikalno ubrzanje neoslonjene mase prednje osovine,
- F_{pck1} [N] - rezultanta elastičnih i prigušnih sila prednjih guma.

$$m_2\ddot{z}_{22} - F_{ck2} + F_{pck2} = 0 \quad (4)$$

gde su:

- m_2 [kg] - neoslonjena masa zadnje osovine,
- \ddot{z}_{22} [$m \cdot s^{-2}$] - vertikalno ubrzanje neoslonjene mase zadnje osovine,
- F_{pck2} [N] - rezultanta elastičnih i prigušnih sila zadnjih guma.

$$F_{pck1} = F_{z01}, \quad F_{pck2} = F_{z02} \quad (5)$$

gde su:

- F_{z01} [N] - pobudna sila od tla preko prednjih točkova,
- F_{z02} [N] - pobudna sila od tla preko zadnjih točkova.

$$F_0 = R_f + R_v + R_j + R_\alpha + R_p \quad (6)$$

gde su:

F_0 [N] - pogonska sila traktora,

R_f [N] - otpor kotrljanja,

R_v [N] - otpor vazduha,

R_j [N] - otpor inercijalnih sila,

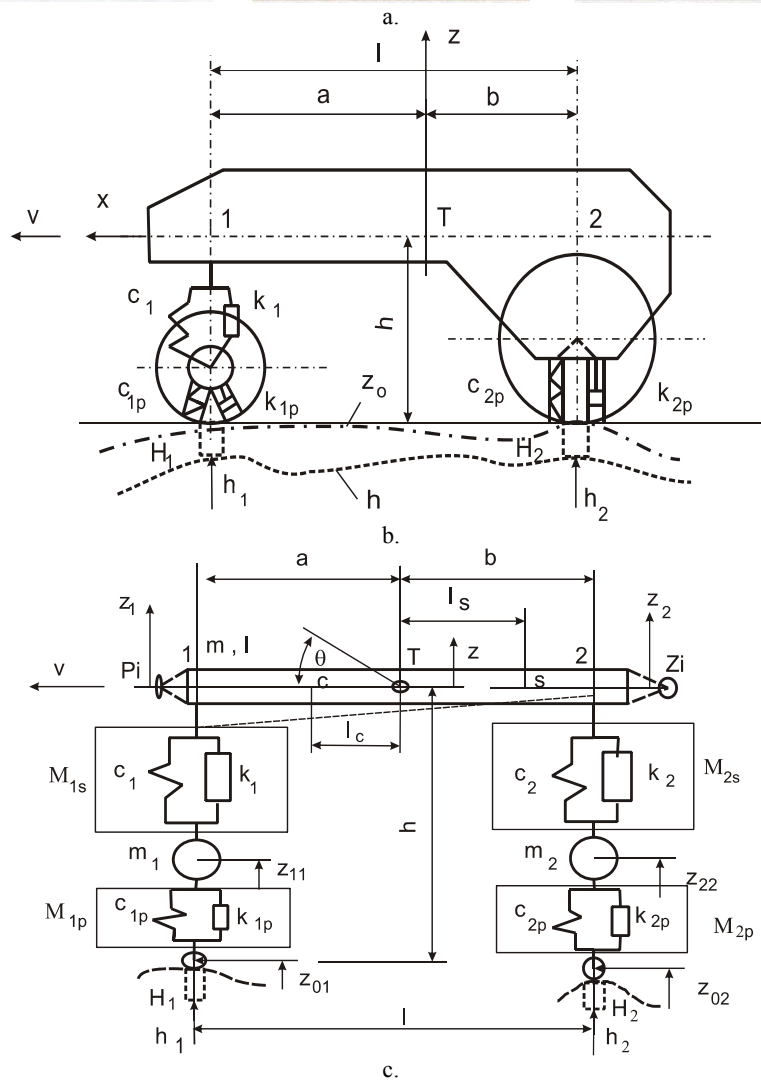
R_α [N] - otpor uspona,

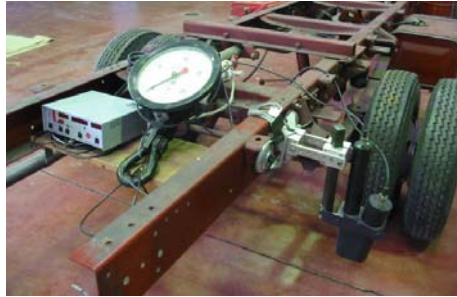
R_p [N] - deo vučne sile traktora za vuču implementa.

Kompleksnost matematičkog modela, prikazanog izrazima (1) do (6), zavisi od prethodno definisane strukture i izabranih, odnosno, određenih parametara gore uključenih modula. Isti mogu biti definisani relativno egzaktnim matematičkim relacijama, što zahteva opsežne teorijske analize podržane eksperimentima u određenim fazama istraživanja. Zatim, prikazani sintetizovanim submodelima baziranim na opsežnim eksperimentima. Moguće je i direktno korišćenje eksperimentalnih, neobrađenih podataka u sprezi sa adekvatnim blokovima i alatima simulacionih programa. Razvijena metodologija i korišćeni pristup u ovom radu, omogućavaju primenu svih ovih varijanti za konkretan slučaj istraživanja.

Jedan sistem za eksperimentalnu podršku simulacionim istraživanjima u ovom radu, u cilju identifikacije elasto-prigušnih karakteristika elastičnog oslanjanja kako traktora, tako njegovih implemenata i drugih samohodnih poljoprivrednih mašina na elastičnim gumama, prikazan je na Sl. 1d, e. Baza eksperimentalnog sistema je merna platforma sa sopstvenim pogonom preko motora SUS, Sl. 1d. Platforma je univerzalne namene, za stacionarna, kvazistacionarna i dinamička ispitivanja drumskih, terenskih, radnih vozila, njihovih agregata, podsklopova i komponenata. Za potrebe ovog rada, odnosno, za predloženu metodologiju, na ovoj platformi se mogu ispitivati i identifikovati submodeli elemenata i komponenata elastičnih oslanjanja traktorskih sistema i mašina, kako osnovnih tako i dopunskih. S obzirom na koncept otvorene noseće strukture i bočni položaj točkova na platformu se mogu postaviti i ispitivati točkovi sa gumama različitih tipova i dimenzija, Sl. 1d, e. Deo merne opreme prikazan na sl. 1 d, uključuje merni dinamometar vučne sile i senzor brzine kretanja Leitz-Correvit LG 2, zatim troosni davač ubrzanja, davač hoda HBM, osmokalni merni sistem i sistem za akviziciju mernih podataka, HBM Spider 8 i lap – top računar.

U stacionarnim uslovima ispitivanja karakteristika elastičnosti guma ili dopunskog elastičnog oslanjanja, vertikalno opterećenje platforme se povećava stepnjevitio i za svaku vrednost opterećenja izmeri se vertikalna deformacija gume, odnosno, opruge. Zatim se formira eksperimentalna zavisnost, opterećenje - deformacija gume i podesnom numeričkom metodom odrede karakteristike krutosti. Pri režimima kvazistacionarnih ispitivanja vertikalno opterećenje platforme se menja kontinualno sa niskim relativnim brzinama, posredstvom potisno – podiznih hidrauličnih uređaja, Sl. 1d, davačem sile se meri tok promene opterećenja a davačem pomeranja deformacija elastične komponente i formiraju zavisnosti opterećenje – deformacija.





d.



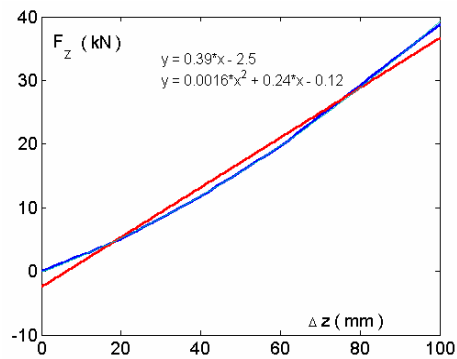
e.

Slika 1. a. konstruktivne izvedbe traktora, b.,c. varijante oscilatornih modela traktora, d. merna platforma sa opremom, e. točkovi sa mernim gumama

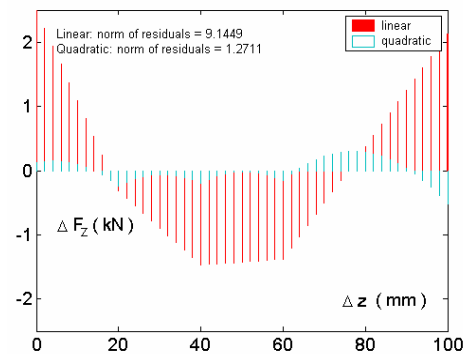
Figure 1. a. tractor design types, b.,c. types of tractor vibration models, d. measurement platform with devices, e. wheels with experimental tires

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

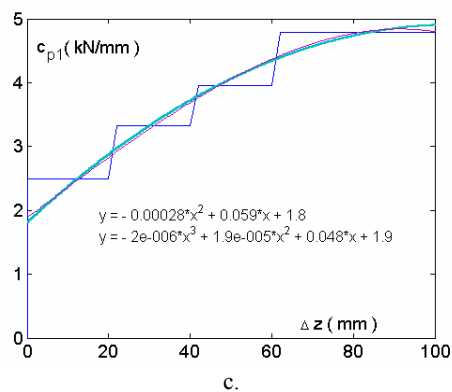
Neki od rezultata istraživanja prikazani su na Slikama 2 i 3. Rezultati prikazani na Slici 2 ilustruju mogućnosti identifikacije elasto-kinematskih karakteristika guma na mernoj platformi pri stacionarnim režimima ispitivanja. Na Sl. 2a dat je prikaz izmerenih vrednosti vertikalnih deformacija gume u funkciji vertikalnog opterećenja. Na istoj slici su prikazane krive aproksimacije ove zavisnosti. Kao što se vidi iz krivih ocene grešaka na Slici 2b, zadovoljavajuća tačnost aproksimacije se postiže polinomom drugog stepena, plava kriva na Sl. 2a. Osim toga, aproksimacija linearnom funkcijom, crvena kriva, na Sl. 2a, i odgovarajuća ocena greške na Sl. 1b, ukazuju na mogućnosti linearizacije elastičnih karakteristika gume i grešku koja se pri tome čini.



a.



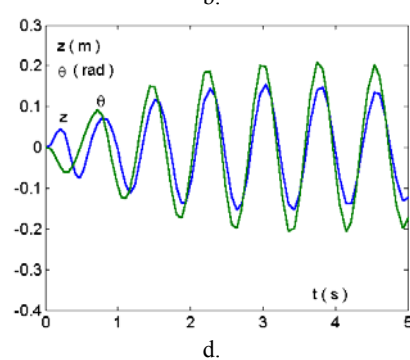
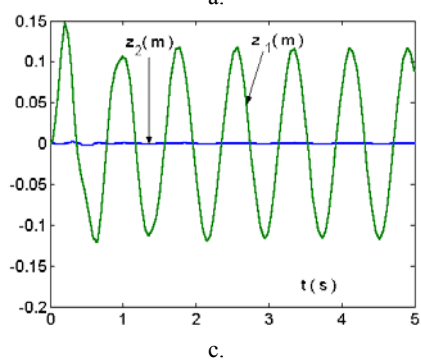
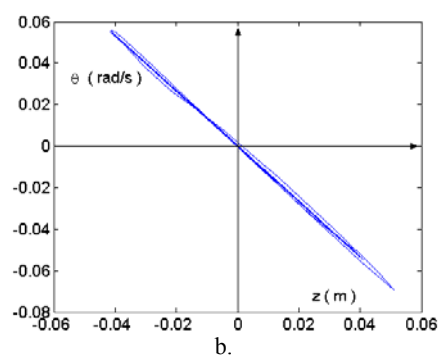
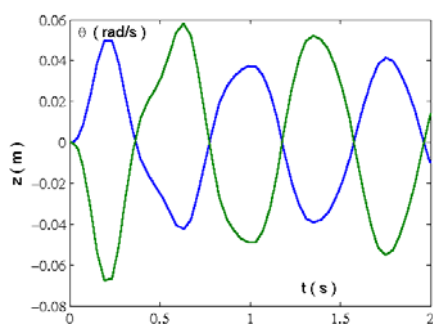
b.

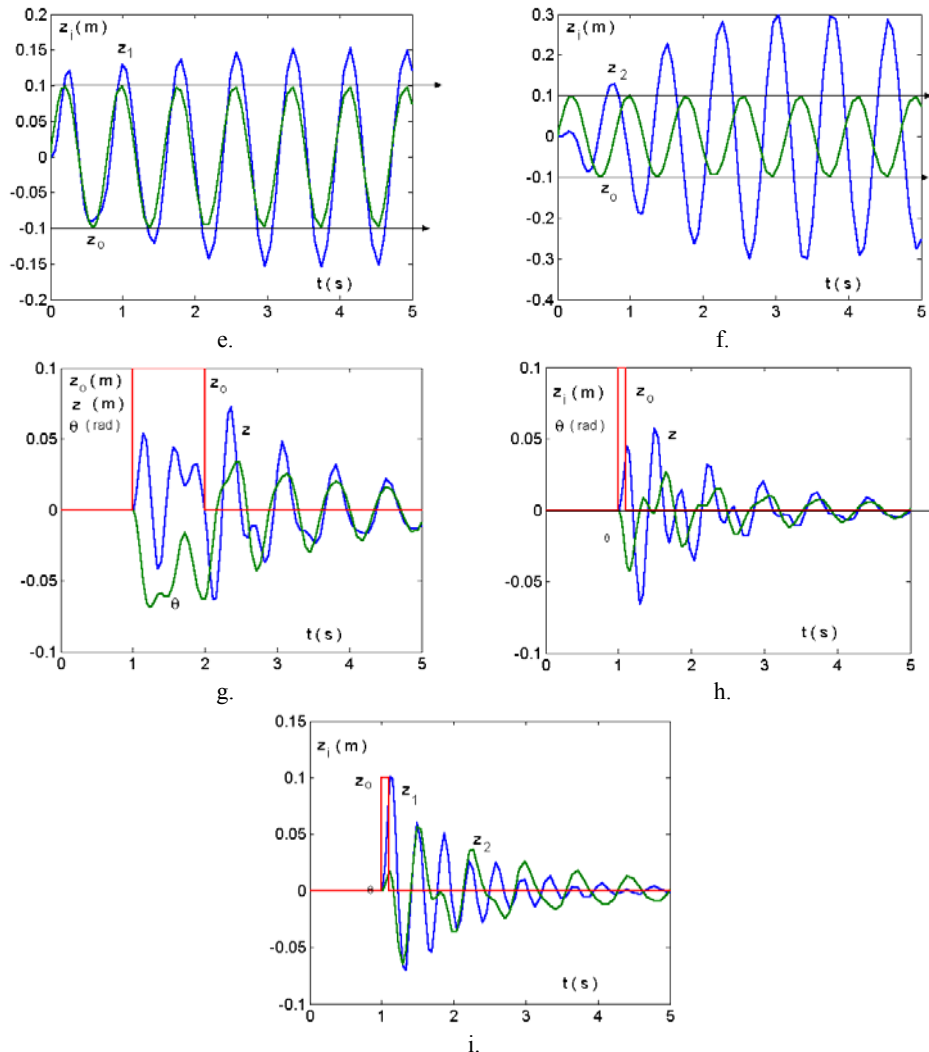


Slika. 2. Eksperimentalne karakteristike elastičnosti traktorske gume

Figure2. Tractor tire elastic characteristics

Na osnovu eksperimentalnih zavisnosti na Slici 2a, određena je karakteristika krutosti gume u funkciji vertikalnog hoda, Sl. 2c. Zadovoljavajuća tačnost se postiže aproksimacionim polinomima drugog i trećeg stepena.





Slika 3. Rezultati simulacionih istraživanja oscilacija traktora

Figure 3. Results of tractor vibration simulation investigation

Rezultati simulacionih istraživanja oscilatornih procesa traktora, za dva posmatrana slučaja, prikazani su na Slici 3. Prvi slučaj, neopterećen sistem, odnosno, traktor bez implementa, Sl. 3a,b,c. Drugi slučaj, opterećen sistem, traktor u sprezi sa implementom, Sl. 3d,e,f,g,h,i. U smislu ilustracije predložene metode, u ovom radu, prvi slučaj je posmatran kao referentni, sa usvojenim parametrima, $a*b=I$, oznake prema Sl. 1c. Poređenjem ovog težinskog stanja i ekvivalentnog težinskog stanja traktora sa implementom, određeni su relevantni indeksi i to, za masu, $m_{II}/m_I=1.33$, za moment inercije, $I_{II}/I_I=3.63$, za koordinatu centra masa $b_{II}/b_I=0.43$. Uticaj ovih odnosa, dakle, težinskog stanja, rasporeda masa i položaja centra masa, težišta, istaknut je pri analizi prikazanih rezultata.

Rezultati, na Sl. 3a,b,c, kao što je rečeno, odnose se na slučaj neopterećenog sistema, pri čemu se prednji točkovi pobuđuju periodičnom funkcijom neravnina tla, oblika : $z(x) = A \sin \Omega x = A \sin(2\pi/\lambda)x$ u prostornom domenu, odnosno, $z(t) = A \sin \omega t = A \sin(2\pi/T)t$, u vremenskom domenu. Imajući u vidu relaciju prostornih i vremenskih koordinata, dobija se matematički model periodične pobude prednjih točkova od tla u obliku: $z(t) = A \sin(2\pi/\lambda)vt$, koji uspostavlja relaciju između visine neravnina A , njihove talasne dužine, λ i brzine v . Rezultati simulacije na gornjoj slici dobijeni su za vrednosti, $A = 0.1m$, $\lambda = 0.5m$, $v = 2.8 m/s$, što približno odgovara parametrima reljefa i režimima kretanja pri grubljem oranju. Kao što se vidi sa Slike 3.a, vertikalno pomeranje oslonjene mase traktora, z , plava kriva, i ugaono zaokretanje, θ , zelena kriva, su takođe periodične funkcije vremena, sa frekvencijom jednakom frekvenciji pobude od tla. Ove dve funkcije su suprotnog znaka, između njih je neznatno fazno kašnjenje i u tesnoj su korelaciji, što se može uočiti na Sl. 3b. Rezultati na Sl. 3c, ukazuju na karakteristike traktora sa skoro raspregnutim oscilacijama prednje i zadnje osovine. Naime, pri pobuđivanju prednje osovine, gore opisanom periodičnom funkcijom tla, prednji deo traktora osciluje periodičnom funkcijom z_1 , zelena kriva na Sl. 3c, a zadnji deo traktora z_2 , plava kriva, na istoj slici, ostaje skoro nepokretan. Prema baznim podacima simuliranog traktora, vrednost pokazatelja sprege oscilacija iznosi 1.04. Imajući u vidu da je za vrednost ovog pokazatelja 1, sistem potpuno raspregnut, neznatne varijacije, koordinate z_2 , ukazuju na adekvatno izabran strukturu i parametre simulacionog modela. Ovi rezultati pružaju uvid u nezavisno oscilovanje pojedinih osovine traktora i pripadajućih delova oslonjene mase, što se ne može direktno postići drugim metodama, s obzirom da su obe osovine istovremeno pobuđene.

Rezultati drugog segmenta istraživanja, Sl. 3d,e,f,g,h, odnose se na opterećen sistem, dakle traktor sa implementom. U gornjem tekstu je ukazano na potencijalne uticaje implementa na oscilatorne parametre, u ovom slučaju, traktorskog sistema, preko brojnih vrednosti relevantnih indeksa. Na bazi tih promena određena je vrednost pokazatelja sprege oscilacija u iznosu od 0.58. Dakle, prisustvo implementa u značajnom stepenu spreže oscilacije prednje i zadnje osovine traktora i time pojačava neke, već nepovoljne efekte oscilatornih procesa. Prikazi dobijenih rezultata na Sl. 3d i nadalje, najbolje to ilustruju. Nivoi vertikalnih i ugaonih oscilacija oslonjene mase traktora, na Sl. 3d su znatno viši u odnosu na prikaz, na Sl. 3a. Ovi nivoi pokazuju i trend porasta sa vremenom, dakle, određenu nestabilnost koordinata položaja, koja u relaciji sa konceptom pogona može dovesti do kompleksnijeg vida nestabilnosti, fenomena „power hop”, [10], [15], [16]. Sprega oscilacija osovine traktora na ovim prikazima je očigledna i za neke kompleksnije analize, veoma ilustrativna. Naime, funkcija periodične pobude, točkova prednje osovine, prikazana je zelenom krivom na Sl. 3e i 3f. Na prvoj slici je i prikaz oscilacija koordinate položaja, plava kriva, koje po fazi i frekvenciji prati pobudnu funkciju, ali sa neznatno pojačanim nivoima. Suprotno ovome, dakle i dalje pri pobudi samo prednjih točkova, zadnji deo vozila osciluje po zakonu periodične funkcije z_2 , plava kriva na Sl. 3f, sa frekvencijom koja prati frekvenciju pobude, ali sa znatnim faznim kašnjenjem i znatnim pojačanjem nivoa amplituda.

Prikazani rezultati na Sl. 3g,h,j, odnose se na isto stanje opterećenog sistema, ali druge vidove pobude od tla. Reč je o karakterističnim oblicima pobude, tako zvana impulsna, zatim step pobuda itd. U ovom radu su uvedeni posebni pojmovi, tako zvani kratkotrajni impuls, odnosno pojedinačna prepreka uzane širine, i dugotrajni impuls, pojedinačna prepreka veće širina ili kombinovana impuls – step pobuda. Smisao definicija ovih pobuda, odnosno efekata njihovog dejstva na oscilacije traktorskog sistema, najbolje se vidi iz prikaza dobijenih

rezultata na pomenutim slikama. Pobuda sistema prema Slici 3g odgovara impulsu veće širine, tj. trajanja 1s, širine prepreke 2.8 m, za datu brzinu kretanja. A iz reakcije sistema na ovu pobudu, promena vertikalnog pomeranja i ugaonog zaokretanja traktora, z , θ , plava i zelena kriva na Sl. 3g, respektivno, vidi se, da prelazni proces sadrži dva segment, prvi koji odgovara step pobudi i drugi, koji odgovara impulsnoj pobudi – dakle kombinovanoj step-impuls pobudi. Reakcija sistema na Sl. 3h,j, je tipična za impulsnu pobudu, u ovom radu, definisanu, kao “uzani impuls”, a prikazuje promene alternativnih koordinata položaja oslonjene mase, z , θ , odnosno, z_1 , z_2 , respektivno. U oba slučaj se radi o slobodnim prigušenim oscilacijama. Brojni su vidovi prepreka i mikro reljefa tla koji se mogu svesti na tri osnovna vida pobude korišćene u ovom radu.

ZAKLJUČAK

Neravnine terena izazivaju složene oscilatorne procese traktorskih sistema, koji utiču na radnu efikasnost sistema, stanje operatora, degradaciju tla. Sprovedena analiza dosadašnjih istraživanja iz domena oscilatorne dinamike traktora pokazuje da je najveća pažnja posvećena konceptu traktora sa primarnim oslanjanjem preko elastičnih guma. Uvođenje dopunskog oslanjanja točkova i osovinama usložava traktorski sistem i otežava teorijsko – eksperimentalna istraživanja. Jedan pristup, prikazan u ovom radu baziran je na korišćenju simulacionog modela modularnog tipa i eksperimentalnog sistema za identifikaciju strukture i parametara modula. Identifikovani moduli elastičnih karakteristika guma ukazuju na njihove nelinearne karakteristike, polinomi drugog i trećeg stepena. Formirani programski blokovi su omogućili uključivanje svih vidova nelinearnosti sistema, oblika pobuda od tla, efekata filtriranja i kašnjenja sistema. Predložena i korišćena eksperimentalno – simulaciona procedura omogućila je nezavisno praćenje pobude preko točkova prednje i zadnje osovine, zatim utvrđivanja stepena njihove sprege i efekata koji ispoljavaju na oscilatorne procese. U tom smislu, uticaj implementa je obuhvaćen relevantnim indeksima uticajnih parametara. Njihova promena je u relaciji sa povećanjem sprege oscilacija po osovinama i nivoa opterećenja. Ilustrativni rezultati potvrđuju da gore prikazana simulaciona metoda uz podršku baza eksperimentalnih podataka može pomoći u smislu sagledavanja nepovoljnih oscilatornih efekata traktorskih sistema i njihovog odklanjanja.

LITERATURA

- [1] Anilovič, V., Marčinskij, J. 1973. Statističeski harakteristiki vozdejsvij nerovnostej puti na podvesku traktorov. *Traktori i seljhozmašini*, N 5, st. 7 – 9.
- [2] Wong, J. 1972. Effect of vibration on the performance off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, Vol. 8, N4.
- [3] Robichand, R., Molnan, M. 1990. Measuring soil roughness changes with an ultrasonic profiler. *Trans. ASAE* 33, 6, 1851 – 1858.
- [4] Wong, J. 2001. *Theory of ground vehicle*. Third edition, John Wiley& Sons.
- [5] ISO 2631, *Evaluation of human exposure to whole-body vibration*. General requirements.

- [6] ISO 5007, *Agricultural wheeled tractors and field machinery – Measurement of whole – body vibration of the operator.*
- [7] Vološin, J., Goljskakov, E. 1974. Primenie teori markovskih procesov k isledovaniju kolebanij kolesnih mašin. *Traktori i seljhozmašini*, N12, 1974.
- [8] Vološin, J., Sinev, A. 1975. K račetu optimalnoj sistemi podresorivanja transportnih mašin. *Traktori i seljhozmašin*, N9, 1975.
- [9] Rill, G., Saly, D., Wilks, E. 1992. Improvement of dynamics wheel loads and ride quality of heavy agricultural tractors bz suspending front axles. *Heavy vehicles and roads technology, safety and policy*, p 116-121. London, 1992.
- [10] Deere & Company. 2011. *How to control power hop: MFWD and 4WD tractors.*
- [11] Owzar, A. 1976. Untersuchung des Schwingungs Verhaltnes von ugefederten luftbereiften Fahrzeugen. *ATZ*, 78, 9.
- [12] Renius, T. 1994. Trends in tractor design with particular reference to Europa. *J. Agric. Eng. Resh.* 57, 3-22.
- [13] Lines, J., Murphy, K. 1991. The stiffness of agricultural tractor tyres. *Journal of terramechanics*, Vol 28, N1, p 49 -64.
- [14] Volfson, B. 1999. Comparison of two simulation models of tire – surface interaction. *Proc. 13th Intl. Conf. of ISIVS*, p. 311 – 318.
- [15] Dessevire, D. 2005. Experimental characterization and numerical modeling of the power hop phenomen. *VDI Berichte, No 1895*, p. 125 – 130Disseldorf, Germany.
- [16] Sakai, K., Sasao, A., Shibusawa, s. 1999. Nonlinear dynamics of bouncing and power hop. *ASABE Paper*, No 991066.

EFFECT OF TERRAIN CHARACTERISTICS ON THE TRACTOR VIBRATION

Rajko Radonjić, Aleksandra Janković, Branislav Aleksandrović

*University of Kragujevac, Faculty of Engineering Sciences, Kragujevac,
Republic of Serbia*

Abstract: In this paper the problems of tractor vibration excited from terrain unevenness are considered. For simulation investigation a modular vibration model of tractor system is developed. A experimental platform for measurement of tire vibration parameters, stiffness and damping, as support to simulation investigation, is used. As ilustrative examples are presented and discused the experimental results of tire characteristics and simulate resultes of tractor vibration for two load states and three form of terrain excitation.

Key words: *terrain, unevenness, tractor, tire, measuremet, vibration, simulation.*

Datum prijema rukopisa: 19.11.2012.
Datum prijema rukopisa sa ispravkama: 21.11.2012.
Datum prihvatanja rada: 25.11.2012.

