

UDK: 629.11.073.23

MOGUĆNOSTI ISPITIVANJA VANPUTNIH VOZILA

Rajko Radonjić

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

Sadržaj: Prikazane su korišćene metode i rezultati istraživanja interakcije vanputno vozilo – zemljište. Istaknuti su aktuelni problemi ispitivanja u ovom domenu. Predložen je eksperimentalni sistem. Dati su i komentarisani rezultati probnih ispitivanja. Razmotrene su nove mogućnosti za ispitivanje vanputnih vozila.

Ključne reči: *osobine zemljišta, vanputna vozila, interakcija, eksperimentalni rezultati.*

UVOD

U fazama razvoja, projektovanja, proizvodnje i korišćenja vanputnih vozila postoji potreba za eksperimentalnim rezultatima iz baze podataka sličnih vozila, odnosno, za sprovođenjem eksperimenata na konkretnom prototipu vozila, serijskom proizvodu ili vozilu u upotrebi. Obim ispitivanja i struktura eksperimentalnih sistema zavise od karaktera istraživanja, uslova u kojima se obavljaju, postavljenog cilja i sl.. Dakle, kontrolna, razvojna, naučna istraživanja, prema prvom kriterijumu. Zatim, laboratorijska, poligonska, terenska, prema drugom kriterijumu. Pri tome, treba imati u vidu da se ova vozila projektuju i realizuju za kretanje po terenima različitih fizičko-mehaničkih karakteristika zemljišta, počev od suvog peska, rastresite oranice, blata, leda, snega veće dubine, do zemljanih puteva ravnog i krutog kolovoza za vreme sušnog perioda. S obzirom da karakteristike zemljišta i okruženja utiču bitno na performanse vanputnih vozila, posebno, na propulzivnu silu, otpore kretanja, prohodnost, bezbednost, ekonomičnost pogona, to poznavanje karakteristika zemljišta i interakcije vozila sa zemljištem i okruženjem, predstavlja značajan segment istraživanja u ovom domenu.

Doprinos rešavanju navedenih problema daje intenzivan razvoj naučne discipline teramehanike, segmenta koji se odnosi na kretanje vozila i mobilnih sistema van puteva [1], [2]. Pored eksperimentalnih istraživanja karakteristika zemljišta i interakcije sa kretačima vozila, koja su prethodila teorijskim istraživanjima, a bila su baza za formiranje odgovarajućih empirijskih modela i rešavanje parcijalnih problema, trebalo je podsticati razvoj i primenu teorijske baze u rešavanju ovih problema. Sa aspekta postignutih rezultata može se reći da se u tome, u priličnoj meri i uspelo [3].

Ispitivanjima na fizičkim modelima postavljao se bazni zahtev – obezbediti analogiju ispitivanih procesa u laboratoriji i uslovima terena, visok stepen korelacije dobijenih rezultata, nezavisno, od parametara korišćenih modela, te stvoriti pouzdane osnove za projektovanje eksperimentalnih sistema i interpretiranje tako dobijenih rezultata. U današnjim uslovima, u rezultatu kombinacije teorijsko – eksperimentalnih metoda, može se govoriti o novim mogućnostima ispitivanja vanputnih vozila, uz korišćenje posrednog određivanja relevantnih veličina, definisanje i realizaciju virtualnih senzora, kao i ugrađenih senzora standardnih funkcija vozila, podržanih informacionim tehnologijama, servisom GPS-a i sl.

PROBLEMI ISTRAŽIVANJA UZAJAMNOG DEJSTVA TOČKA I ZEMLJIŠTA

Na primeru prostornog modela uzajamnog dejstva točka sa pneumatikom i zemljišta, u radu [4], ukazano je na značaj istraživanja relacija između opterećenja i deformacija, u tri relevantna, upravna pravca, x , y , z , sa koordinatnim početkom pozicioniranim u kontaktnoj zoni spregnutog para. Sa ovim tipom uopštenog modela obuhvaćeni su parcijalni modeli, korišćeni za opis uzajamnog dejstva u odvojenim ravnima, najčešće, vertikalnoj i podužnoj. U tom cilju korišćeni su modeli različite strukture i broja parametara. Nekoliko primera, u implicitnoj formi, za vertikalnu i podužnu ravan, (1), (2), respektivno, dati su na ovom mestu rada [1], [2], [4]:

$$\sigma_{z1} = f_1(k, z), \sigma_{z2} = f_2(k_c, k_\phi, b, v, z), \sigma_{z3} = f_3[\sigma_{z0}, \text{th}(k, \sigma_{z0}, z)] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= f_1(\tau_0, \sigma_z, \phi, k_{i\dots}, x), \tau_2 = f_2[f_k, \sigma_z f_{ek}, \text{ch}(x, k_r), \text{th}(x, k_r)], \\ \tau_3 &= f_3[f_k, \sigma_z, \text{th}(x, k_r)] \end{aligned} \quad (2)$$

Prikazana tri modela sabijanja zemljišta pod dejstvom vertikalnog opterećenja kretača (1), predstavljaju tri različite matematičke relacije naprezanja, σ_z , od deformacije, z - linearna, stepena, tangens hiperbolična, respektivno, sa relevantnim parametrima, k , k_c , k_ϕ , v , b , dobijenih aproksimacijom eksperimentalnih zavisnosti. Pri tome su prva dva modela, posebni slučajevi uopštenog, trećeg modela, tangens hiperbolične funkcije. Ovaj poslednji, definiše monotono rastuću funkciju naprezanja od deformacije u posmatranom pravcu, sa tri prepoznatljive zone, ravnomerno sabijanje, sabijanje i tragovi smicanja, plastično razvlačenje sa okončanjem sabijanja zemljišta i njegovog potiskivanja u bočnom pravcu.

Određivanje zakonitosti promene naprezanja na smicanje zemljišta, τ u funkciji odgovarajuće deformacije u podužnoj ravni, x , prema modelima (2), bilo je predmet brojnih istraživanja i studija u proteklom periodu, ali i sadržaj aktuelnih istraživačkih zadataka i izazov za planiranje daljih aktivnosti u ovom domenu. Bazni model za $\tau_1=f_1(\dots)$, sadrži implicitno date parametre koji ukazuju da se otpor zemljišta smicanju od kretača vozila, ispoljava dejstvom molekularnih i kapilarnih sila prianjanja i silom unutrašnjeg trenja. Eksperimentalna istraživanja su pokazala da se naprezanje na smicanje menja u procesu neustaljenog, relativnog kretanja dodirnih površina zemljišta i kretača, po trigonometrijskim hiperboličnim funkcijama relativnog kretanja, x (2). Između dva posmatrana stanja interakcije zemljišta i kretača, stanja mirovanja i stanja

ustaljenog kretanja, odigra se neustaljeni prelazni proces opisan modelom (2), što ima za posledicu i promenljivu vrednost podužne reakcije zemljišta, kao ekvivalenta propulzivne, vučne sile.

Međutim, dinamički odnosi deformabilnog kretača vozila i deformabilnog zemljišta, za opšte posmatrani slučaj, dovode do sprezanja posmatranog sistema, opterećenja – deformacije, u relevantnim pravcima i potrebe prostornog prikaza naponskog stanja spregnutog para, čime se istaknuti problemi teorijskih i eksperimentalnih istraživanja usložavaju. Naime, definisano naponsko stanje opterećenih zona spregnutog para, pneumatik - zemljište, omogućava da se na korektan način odrede naprezanja u kontaktnoj površini, kao granični uslovi, neophodna za proračun pokazatelja vuče, otpora kretanja i utroška energije [5].

Eksperimentalna istraživanja, u smislu identifikacije naponskog stanja najčešće su obavljena u aproksimiranim uslovima, uzorcima zemljišta i opitnim uređajima bevametrima, bez adekvatne teorijske podrške u dužem vremenskom periodu. Polazne zavisnosti za proračun naprezanja zemljišta su formule teorije elastičnosti koje je objavio francuski naučnik Boussinesq, 1886. godine [2], [5]. Njegovo rešenje daje izraz za raspodelu naprezanja u polubeskonačnim homogenim, izotropnim i elastičnim sredinama, pod dejstvom vertikalnih koncentrisanih opterećenja. Primenjeno na raspodelu normalnog naprezanja u opterećenoj zoni zemljišta daje sledeće izraze u cilindričnim i polarnim koordinatama:

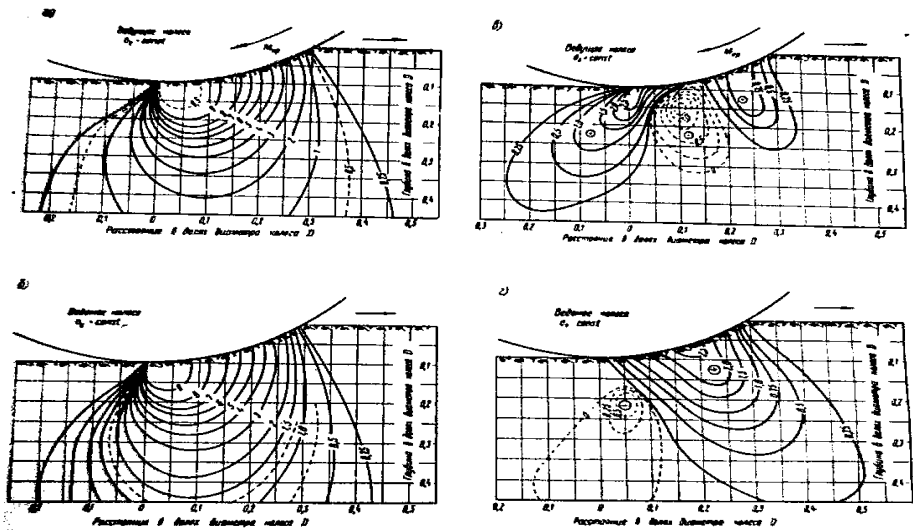
$$\sigma_z = \frac{3G}{2\pi} z^3 (x^2 + y^2 + z^2)^{-5/2}, \quad \sigma_r = \frac{3G}{2\pi R} \cos\theta \quad (3)$$

Ovaj izraz je korigovan, u kasnijim istraživanjima s obzirom da zemljište na mestu dejstva opterećenja ne raspolaže svojstvima elastičnosti, uzimajući u obzir i koncentraciju naprezanja, i konačne površine kontakta a ne koncentrisane tačke [2].

Primena teorije plastične ravnoteže u interakciji kretač vozila – zemljište, stvorila je bazu za identifikaciju parcijalnih modela, (1) i (2) i pretpostavke u radovima [1], "da se reakcija zemljišta u svim tačkama ispoljava kao radijalno naprezanje i ravna je normalnom pritisku kontaktne površine na toj dubini", odnosno, "da je naprezanje, koje dejstvuje na obod točka, ravno normalnom pritisku kontaktne površine na toj dubini". Dobijeni izrazi su omogućili određivanje otpora kretanja, dubinu prodiranja točka u zemljište, vučnu silu, uzimajući u obzir fizičke i analitičke sprege pri interakciji spregnutog para u vertikalnoj i podužnoj ravni. Isti su bili korigovani rezultatima radova, citiranim u [2], parametrima koji utiču na oblik i pokazatelje raspodele normalnih naprezanja. Odnosi sprege normalnih i tangencijalnih naprezanja ispoljavaju uglavnom negativne efekte, porast otpora kretanja i umanjenje raspoložive vučne sile. Kompleksni tokovi pomenutih naprezanja se mogu uočiti sa prikaza, na sl. 1, sa očiglednim razlikama za slučaj pogonskog i vođenog, gonjenog točka [5].

Sumiranjem efekata na vučne pokazatelje vanputnog vozila sa karakterističnim profilom protektora pneumatika, izraženim rebrima, ističu se tri komponente vučne sile, usled površinskog trenja, usled otpora smicanja zemljišta, usled otpora rezanja zemljišta pri formiranju kolotraga. Zavisno od stanja i karakteristika zemljišta, vlažno, suvo, elastično, plastično, razlikovaće se vrednosti ovih komponenata. Na suvim terenima je dominantna prva, na vlažnim, druga i treća. Tipični prikazi izgleda formiranih kolotraga, u različitim uslovima i režimima kretanja, ispitivanja na sl. 3, su u relaciji sa pokazateljima efikasnosti korišćenja vozila.

Rezultati analize dosadašnjih istraživanja, prezentiranih u ovom poglavlju rada, ukazuju na svu kompleksnost i aktuelnost predmetne problematike. Pri tome, za rešavanje nekih postojećih problema potrebno je sagledati mogućnosti koje pružaju savremene naučne discipline, napredne tehnologije i slično. Sa druge strane, neka značajna pitanja iz ovog domena nisu do sada adekvatno tretirana, pa ni isticana kao problemi. U skladu sa gore korišćenim pojmovima, sprega relevantnih ravni interakcije kretača i zemljišta – prostorni, 3D – model, prostorno naponsko stanje, i slično, ovde se ističe nedovoljno osvetljen i u analizama zapostavljen problem interakcije vozila i zemljišta sa aspekta bočne dinamike vanputnih vozila, relevantne i za vučnu efikasnost ali primarno za stabilnost, upravljivost, bezbednost.



Sl. 1. Linije konstantnih vertikalnih i horizontalnih normalnih naprezanja zemljišta u kontaktu sa pokretnim točkom : gore – pogonski, dole – gonjeni [5].

ISPITIVANJE UTICAJA UZAJAMNOG DEJSTVA TOČKA I ZEMLJIŠTA NA BOČNU DINAMIKU VOZILA

U domenu dinamike drumskih vozila značajni rezultati su postignuti u sagledavanju uticaja procesa u kontaktu pneumatik - kolovoz na dinamičke odnose vozila [8]. Definisani su pokazatelji "moći nošenja" ovog kontakta u podužnoj i bočnoj ravni i njihova uslovljenost, iskazani preko komponenta ukupne sile prijanjanja. Uključeni su karakteristični parametri, i to komponente krutosti pneumatika u tri upravna pravca, odgovarajuće deformacije, klizanja, efekti skretanja pneumatika. U domenu dinamike vanputnih vozila stanje je drugojačije. Više su potencirani problemi vuče pa prema tome, i moć generiranja propulzivne sile kontakta u podužnom pravcu. O mehanizmu istovremenog generiranja i prenošenja sile u bočnom pravcu, u ovim uslovima, skoro da nema publikovanih rezultata.

Saglasno rezultatima ispitivanja podužne dinamike vanputnih vozila, prikazanim u radu [4], iskustvu u ispitivanjima podužne i bočne dinamike drumskih vozila [6], u ovom radu prezentiramo naš pristup pri rešavanju problema ispitivanja bočne dinamike vanputnih vozila, uz isticanje novih metoda koje stoje na raspolaganju. U tom smislu, na sl. 2., prikazane su varijante predloženog eksperimentalnog sistema i blok dijagram izbora koncepta i metoda eksperimentisanja. Pri formiranju algoritma, vodilo se računa o mogućnostima koje pružaju konvencionalne metode ispitivanja: a) eksperimenti na pojedinačnom točku ili kompletnom vozilu u terenskim uslovima ili na realizovanim poligonima. Zatim korišćenje fizičkih modela i dimenzione analize. I konačno, postavljanje matematičkih modela i korišćenje svih mogućnosti simulacije, identifikacije i estimacije sa virtualnim eksperimentisanjem [8].

Na sl. 2b, varijanta 1, prikazuje mogućnost realizacije eksperimenta za ispitivanje moći nošenja (istovremenog prenošenja sila), kontakta točak-zemljište u podužnom i bočnom pravcu, uz istovremeno dejstvo podužne i bočne sile, F_P i F_B , respektivno, pri režimima opterećenja do podužnog proklizavanja. Eksperimentalni sistem može biti realizovan na poligonu i u realnim uslovima terena. Merne veličine su sile, komponente translatorne brzine vozila, podužna i poprečna, ugaone brzine točkova, ugao i obrtni moment na točku upravljača, uglovi i ugaone brzine zaokretanja vozila oko vertikalne i podužne ose, bočno ubrzanja centra masa [4], [6]. Karakter mernih veličina i mernih režima: podužna komponenta brzine približno nula, podužna vučna sila impulsnog toka, zavisno od režima potezanja, bočna sila programiranog toka, sa strane prateće platforme. Varijanta eksperimenta označena sa 2, na sl. 2 b, za razliku od prethodne, omogućava kretanje opitnog vozila promenljivom brzinom, saglasno zahtevima za ovaj vid ispitivanja. Varijante prikazane na sl. 2b, pod rednim brojevima 3 i 4, su označene kao direktna i inverzna. U prvom slučaju, opitno vozilo je i vučno (vuče mernu platformu prikazanu u radu [4]). U drugom slučaju opitno vozilo je vučeno mernom platformom. Pokazalo se celishodnim, da se ispitivanja u ova dva slučaja sprovode pri konstantnoj brzini kretanja opitne konfiguracije u smislu komparativnih analiza sa postojećim rezultatima iz domena podužne dinamike.

Kao rezultat obrade eksperimentalnih podataka dobijaju se aproksimativne zavisnosti relevantnih veličina:

$$\begin{aligned} F_x &= f_1(s, \alpha, F_z), F_y = f_2(\alpha, s, F_z), F_x = f_3(\alpha, s, F_z), \\ F_y &= f_4(F_x, \alpha, s, F_z) \end{aligned} \quad (4)$$

sa uvedenim oznakama, F_x , F_y , F_z - podužna, bočna, vertikalna komponenta sile kontakta s – podužno klizanje, α – ugao bočnog skretanja pneumatika. Prva tri izraza definišu parcijalne, a četvrti, rezultujuću, kompleksnu karakteristiku interakcije točak sa pneumatikom – zemljište. Pri tome, nezavisno promenljiva na prvom mestu u zagradi je naneta na apcisnu osu, preostale dve, odnosno, tri u zadnjem izrazu, su parametri snopa krivih. Pored grafičkih prikaza, sa primarnim isticanjem tokova promene, rezultati mogu biti prezentirani i tabelarno, matricno, sa kvantitativnim pokazateljima. Kroz tri ilustrativna primera prikaza dobijenih mernih rezultata mogu se sagledati relacije podužne i bočne komponente sile kontakta i uticajni parametri.

Primer 1: $s = 20\%$, $\alpha = 0 - 15^\circ$, $F_z = 350 - 450$ daN, $-\Delta F_x = 25.9\% - 33\%$

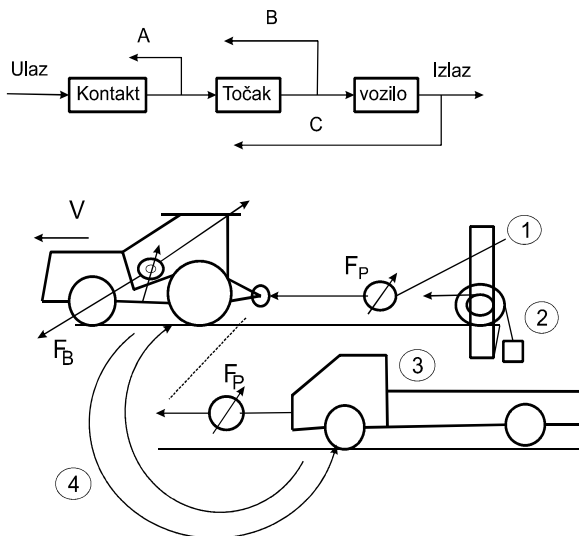
Primer 2: a) $F_x = 0$ daN $\rightarrow F_y = 290$ daN; $F_x = 200$ daN $\rightarrow F_y = 210$ daN, $\alpha = 25^\circ$,
 $s = 17-50\%$, $-\Delta F_y = 27.5\%$; b) $F_x = 0$ daN $\rightarrow F_y = 175$ daN;
 $F_x = 200$ daN $\rightarrow F_y = 110$ daN, $\alpha = 15^\circ$, $s = 10 - 50\%$, $-\Delta F_y = 37\%$

Primer 3: $F_x = 115$ daN $\rightarrow F_y = 0$ daN; $F_x = 0$ daN $\rightarrow F_y = 290$ daN, $s = 15\%$, $\alpha = 0 - 23^\circ$

Prema prvom primeru, pri konstantnom podužnom klizanju 20%, u intervalima izmene ugla skretanja, $0-15^\circ$, i vertikalnog opterećenja, 350–450 daN, podužna reakcija opadne za 25.9–33%, pa prema tome i vučna efikasnost vozila. U ovom smislu veći gubici su pri višim vrednostima vertikalnog opterećenja točka. Primeri 2 i 3, jasno ukazuju na raspodelu sile prijanjanja u podužnom i bočnom pravcu, F_x , F_y , zavisno od vrednosti uticajnih faktora, Pri čemu se može govoriti o gubicima vučne sile, ΔF_x , i gubicima sile bočnog nošenja, ΔF_y . Izgledi tipičnih kolotruga pri sprovedenim ispitivanjima su prikazani na sl. 3, i formiraju bazu fotografija za dalje analize.

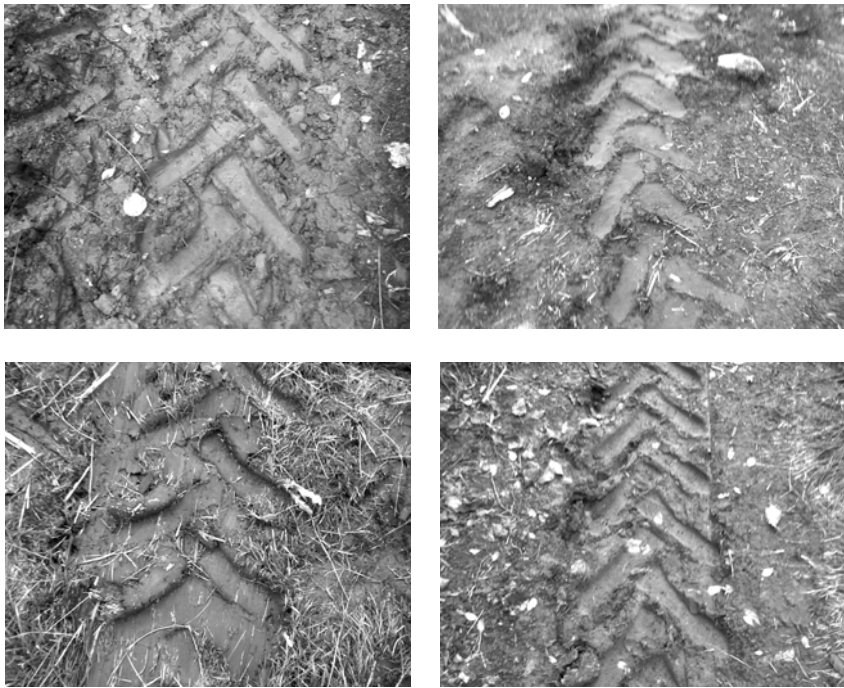
NOVE MOGUĆNOSTI ISPITIVANJA VANPUTNIH VOZILA

Peta varijanta eksperimentisanja u odnosu na prikazane, na sl. 2b, je bazna varijanta samohodnog, opitnog vozila sa dve podvarijante, kao mogućnosti: a) autonoman senzorski-merno-registracioni opitni sistem [6], b) opitni sistem sa GPS podrškom [7]. Pri izboru koncepta opitnog sistema, zavisno od cilja i raspoloživih sredstava, od koristi može biti algoritam na sl. 2a. Na ovom prikazu istaknuta je potreba merenja normalnih i tangencijalnih napreznja na kontaktnoj površini, A, zatim komponentata sile na točku, B, u smislu utvrđivanja njihovih relacija, to jest, mehanizma generiranja i prenošenja, kao i uticaja na procese merodavne za ponašanje vozila, C.



Sl. 2. a, b. Algoritam i šematski prikaz eksperimentalnog sistema

Povratne sprege A, B, C, ukazuju na mogućnosti invertovanja mernog sistema, što znači, na bazi izmerenih izlaza i identifikovanih prenosnih struktura pod sistema i sistema, odrediti ulaze, pobudna dejstva na sistem, koja su u ovim problemima praktično, nemerljiva - procesi u kontaktnoj površini. Na ovim principima je zasnovana primena ITFC sistema za simuliranje opterećenja vozila, kao i primena virtualnih senzora i virtualnih eksperimenata [6], [8]. Određene mogućnosti ispitivanja pruža i rekonstrukcija procesa ponašanja vanputnog vozila na osnovu analiza geometrije i parametara formiranog kolotruga, sl. 3, softverom za obradu slike, sa znatno više raspoloživih informacija u odnosu na obradu kolotruga drumskog vozila pri rekonstrukciji saobraćajne nezgode.



Sl. 3. Izgled tragova točkova pri ispitivanju vanputnog vozila

ZAKLJUČAK

Proučavanje interakcije kretača vozila i zemljišta, predstavlja značajan segment ispitivanja vanputnih vozila. Brojni rezultati iz ove problematike ukazuju na značaj iste ali i na teškoće pri sprovođenju istraživanja. Razvoj savremenih teorijskih i eksperimentalnih metoda, numeričkih metoda proračuna, matematičke simulacije, metoda merenja, sakupljanja i obrade podataka, omogućio je kompleksniji pristup u formulisanju i rešavanju problema iz ovog domena.

LITERATURA

- [1] Bekker G.: Off – the – road locomotion. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1960.
- [2] Wong J. : Theory of ground vehicles. Third Edition. John Wiley & Sons, inc, New York, 2001.
- [3] Fukami K.: Mathematical models for soil displacement under a rigid wheel. Journal of Terramechanics 43, 2006, p.p. 287-301.
- [4] Radonjić R, Glišović J.: Prilog problemima ispitivanja vanputnih vozila. Poljoprivredna tehnika, 2, 2007, 25-30.
- [5] Babkov B., Gejbovič G.B.: Osnovi gruntovedenija i mehaniki gruntova. "Visšja škola", Moskva, 1964.
- [6] Radonjić R.: Identifikacija dinamičkih karakteristika motornih vozila. Monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1995.
- [7] Stafford J., Ambler B.: In – field location using GPS spatially variable field operations. Computers and Electronics in Agriculture 11, 1994, 23-36.
- [8] Radonjić R.: Identification of tire – road interaction. International Congress – Motor Vehicles & Motors 2008, MVM 20080006, Kragujevac, 2008.

POSSIBILITIES TO OFF - ROAD VEHICLES TESTING

Rajko Radonjić

Mechanical Faculty - Kragujevac

rradonjic@kg.ac.yu

Abstract: The previously used methods and investigation results of the off - road vehicles – soil interaction are presented. The actual testing problems in this domain are pointed out. An experimental system is proposed. Preliminary testing results are given and commented. New possibilities to off – road vehicle testing are considered.

Key words: *soil properties, off - road vehicles, interaction, experimental results.*