Dr Miroslav Demić *
profesor, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Kragujevac

Mr Predrag Popović,
dipl. inž.
Institut za nuklearne nauke
— Centar za motore i vozila,
Vinča

Mr Vitomir Pijevac,
dipl. inž.
FAP Korporacija, Priboj

PRILOG UTVRĐIVANJU STVARNIH VIBRACIONIH OPTEREĆENJA SPECIJALNOG ČETVOROOSOVSKEG KAMIONA

UDC: 629.114.012.1-445.001.57

Rezime:

Noseći sistem i mostovi kamiona izloženi su delovanju dinamičkih opterećenja. Kako je pri njihovom projektovanju (za potrebe proračuna i ispitivanja) neophodno poznavanje stvarnih opterećenja, u radu su prikazani delimični rezultati eksploatacionih istraživanja vibracionih opterećenja jednog specijalnog četvoroosovinskog kamiona formule točkova 8x8. Tokom ispitivanja posebna pažnja posvećena je vertikalnim vibracijama okvira i vertikalnim i podužnim vibracijama mostova vozila u karakterističnim eksploatacionim uslovima. Statistička analiza rezultata ispitivanja, primenom metode srednjih vrednosti oblasti i metode prelaza graničnih nivoa, omogućila je definisanje potrebnih informacija za proračun i ispitivanje pomenutih sistema posmatranog vozila.

Ključne reči: kamion, vibracije, statistika.

A CONTRIBUTION TO THE DETERMINATION OF ACTUAL VIBRATORY LOADING OF A SPECIAL FOUR AXLE TRUCK

Summary:

Frame and driving axles of trucks are affected by dynamical loading during service period. Actual loading is necessary to be known in the designing phase (for calculations and investigations). Partial results of investigations of vibratory loading of a special four axle truck with 8x8 driving line are presented in the paper. Vertical vibrations of the frame and vertical and longitudinal vibrations of driving axles of an above-mentioned truck in characteristic service conditions are emphasized. Statistical analysis of investigations results, performed by the Range — Mean Method and the Level — Crossing Method, made it possible to define necessary information for calculation and investigation of above-mentioned vehicle systems.

Key words: truck, vibrations, statistics.

Uvod

U toku projektovanja motornih vozila i njihovih sklopova često se javljaju veoma oprečni zahtevi, kao na primer: mala masa — velika nosivost, mali spoljni gabariti vozila — maksimalni komfor putnika i sl. Očigledno se nameće potreba da se u toku pro-

jektovanja vozila izvrši optimizacija konstrukcije elemenata i sklopova, uz uvođenje ciljeva obavljanja namjenjenih funkcija, postizanja očekivanog veka, prihvatljive pouzdanosti i zadovoljavanja odgovarajućih zakonskih propisa [3, 11, 14—18].

Kako su neki od postavljenih ciljeva u tesnoj vezi sa opterećenjima kojima su elementi, agregati i vozilo u celini izloženi, u ovom radu biće re-

* Akademik Akademije transporta i Akademije kvaliteta Ruske Federacije.

či o utvrđivanju stvarnih vibracionih opterećenja sistema jednog specijalnog kamiona, formule točkova 8x8, iz proizvodnog programa FAP. Naime, delimično su prikazani rezultati ispitivanja vibracionih opterećenja mostova i okvira pomenutog vozila u realnim eksploatacionim uslovima, radi stvaranja pouzdanih uslova i kriterijuma za proračunske provere i laboratorijska ispitivanja pomenutih sistema.

Celishodno je da se ukaže na neke činjenice iz teorije motornih vozila [4—6, 12, 13]. Naime, motorna vozila čine sklopovi, agregati i sistemi (koji se u zavisnosti od potrebe mogu posmatrati kao kruta ili elastična tela) međusobno povezani elastoprigušnim elementima, najčešće nelinearnih karakteristika. Pri njihovom kretanju po neravnim putevima mikro-profila slučajnog karaktera, usled neuravnoteženih obrtnih masa, neuniformnih pneumatika ili neuravnoteženog (nestacionarnog) rada motora, vozilo u opštem slučaju (kao i njegovi delovi) vrši slučajna prostorna vibraciona kretanja [4, 6, 12, 13]. Posledica takvih kretanja su stvarna radna opterećenja, koja su u najopštijem slučaju stohastičkog karaktera.

Parametri tih opterećenja mogu se utvrditi dinamičkom simulacijom uz korišćenje odgovarajućih vibracionih modela (sa konačnim ili beskonač-

nim brojem stepeni slobode kretanja) [4, 6, 12, 13]. Pri tome treba imati u vidu činjenice koje su poznate iz [6, 12, 13] da linearni i nelinearni vibracioni modeli motornih vozila, pod dejstvom pobuda stohastičkog karaktera, vrše stohastičke vibracije. Analitički se može dokazati da u slučaju pobuda od mikroneravnina puta, koje se pokoravaju Gausovoj (normalnoj) raspodeli, i vibracioni model vozila vrši stohastičke vibracije koje se pokoravaju toj istoj raspodeli. Kako se u ovom radu žele utvrditi stvarna radna opterećenja izabranih sklopova i sistema kamiona, neophodno je da se to učini eksperimentalnim putem.

Metod i uslovi ispitivanja

Analize izvršene u [7—10] pokazale su da je celishodno registrovanje vertikalnih vibracionih ubrzanja okvira kamiona iznad prednjeg i zadnjeg tandema i vertikalnih i podužnih vibracionih ubrzanja drugog i trećeg pogonskog mosta. Vertikalne vibracije okvira registrovane su u njegovoj podužnoj osi simetrije, a vertikalne i podužne vibracije mostova registrovane su u osi simetrije ispod gibanja. Ovakav izbor mernih mesta stvorio je uslove za izračunavanje vibracionih ubrzanja bilo koje tačke po dužini okvira,

Sl. 1 — Merna mesta

pod uslovom da se on posmatra kao kruto telo [4—7, 12, 13] kao i sistema za vođenje točkova.

Merne veličine registrovane su uz korišćenje davača ubrzanja HBM B12/200 i pojačavača HBM KWS/6T-5, kao i magnetofona HP 3964A, čime je omogućena kasnija obrada podataka. Pri postavljanju pretvarača ubrzanja poštovane su preporuke njihovih proizvođača, tako da su minimizirane greške merenja. Bliže informacije o načinu postavljanja pretvarača ubrzanja mogu se naći u [10], a radi ilustracije, na slici 1, prikazana su merna mesta.

Kako su režimi opterećenja polazne veličine pri projektovanju, proračunu i konstrukciji, izboru uslova ispitivanja mora se posvetiti posebna pažnja. Radi pravilnog utvrđivanja radnih opterećenja sklopova, agregata i sistema posmatranog kamiona, neophodno je naglasiti da uslovi rada zavise od: intenziteta eksploatacije, vrste puta sa aspekta makro i mikroreljefa, načina korišćenja i okruženja. Ovi činioči detaljno su objašnjeni u [15]

Ocenjeno je celishodnim [18] da se kamion ispita sa punim opterećenjem, tako da je njegova ukupna masa tokom ispitivanja iznosila 31000 kg.

Imajući u vidu pretežnu namenu kamiona [7, 8, 18], definisana je ukupna struktura uzorka puta dužine 150 km, od čega: asfaltnog puta 50 km (33%), makadama sa lošom podlogom 60 km (40%), zemljanog puta 20 km (13,3%) i ledine 20 km (13,3%).

Asfaltni put imao je mestimična oštećenja i nekoliko blagih krivina. Prosečna brzina kretanja iznosila je 56 km/h, a ispitivanja su obavljena uz intenzivna kočenja na svakih 5 km puta, uz promenu svih stepena prenosa.

Makadamski put imao je podlogu od tucanog kamena i veće neravnine (dužina neravnina 0,2 do 8 m, a visina 0,1 do 0,3 m). Prosečna ostvarena brzina kretanja iznosila je 31 km/h.

Na zemljanom putu sa većim neravninama prosečno ostvarena brzina iznosila je 22 km/h, a na ledini obrasloj travom, sa podlogom od peska i sa različitim vrstama prepreka — 18 km/h.

Statistička obrada eksperimentalnih podataka

Analize svih mernih veličina pokazale su da one pripadaju grupi stohastičkih procesa, a radi ilustracije, na slici 2, prikazan je primer jednog zapisa u vremenskom domenu. Uobičajeno je da se, ako se ima u vidu ve-

Sli. 2 — Primer vremenskog zapisa ubrzanja

ća dužina vremenske realizacije, ove veličine posmatraju kao stacionarne i ergodične [1, 2]. Za obradu tih procesa postoji više metoda [1, 2], a imajući u vidu cilj istraživanja, ocenjeno je celishodnim da se izvrši statistička obrada registrovanih analognih veličina metodom klasiranja srednjih vrednosti oblasti (Range-Mean Method) i

metodom prelaska graničnih nivoa (Level-Crossing Method). Kao što je poznato, prva metoda je dvoparametarska i sastoji se u utvrđivanju izmena amplituda oko srednjih vrednosti, a druga jednoparametarska i zasniva se na brojanju pojava prelaska graničnih nivoa [8]. Obrada podataka izražena je primenom računarskog sistema Hewlett Packard 3052.

Analiza dobijenih rezultata

Prilikom analize statističkih podataka posebna pažnja posvećena je informacijama dobijenim na osnovu dvoparametarskih raspodela.

Treba napomenuti da dvoparametarska raspodela predstavlja prostornu površinu, a ilustrativni primer je prikazan na slici 3. Radi daljeg korišćenja dobijenih rezultata urađeni su »nulti preseki« na osnovu kojih su de-

finisane matrice raspodela srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja. Primenom statističkih metoda [16] u matricama su definisane margine koje predstavljaju kumulativne učestanosti pojavljivanja pomenutih veličina. Imajući u vidu rasipanje rezultata, ocenjeno je celishodnim [10] da se odbace sve vrednosti čija je verovatnoća pojavljivanja mala (praktično su posmatrane vrednosti čija je verovatnoća pojavljivanja iznad 99,80 %). Na taj način definisani su intervali srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja.

U toku obrade podataka izvršeno je klasiranje izmerenih vibracija kako za pojedine karakteristične deonice (asfalt, makadam i sl.), tako i za celu dužinu puta (»zbirno«).

Pored dvoparametarskih raspodela u analizi su korišćene i jednoparametarske (histogrami), koje su omogućile izračunavanje kumulativnih učestanosti radi utvrđivanja zakona ra-

Sl. 3 — Primer dvoparametarske raspodele

VERTIKALNO UBRZANJE DRUGOG MOSTA
ISPRESECANA LEDINA

Sl. 4 — Primer histograma raspodele

spodela srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja (primer histograma prikazan je na slici 4).

Vertikalna ubrzanja okvira

Vertikalna ubrzanja okvira predstavljaju stohastička dvoznačno-sime-

trično promenljiva opterećenja, u svim eksploatacionim uslovima.

Na osnovu dvoparametarskih raspodela utvrđene su karakteristične vrednosti koje su date u tabeli 1.

Analizom podataka iz tabele 1 može se utvrditi da se maksimalna vrednost vertikalnih ubrzanja okvira jav-

Tabela 1

Raspodela srednjih vrednosti i amplituda vertikalnih ubrzanja okvira iznad prednjeg (P) i zadnjeg (Z) tandema

Vrsta puta	Intenzitet srednje vrednosti	Kumulat. učest. (%)		Intenzitet amplituda	Kumulat. učest. (%)	
		P	Z		P	Z
Asfalt	±0,2 g	99,83	99,86	0 do 0,3 g	99,83	99,86
Makadam	±0,3 g	99,86	99,50	0 do 0,4 g	99,83	99,60
Zemlj. put	±0,3 g	99,85	99,65	0 do 0,4 g	99,86	99,86
Ledina	±0,3 g	99,86	/	0 do 0,4 g	99,66	/
Zbirno	±0,3 g	99,88	99,65	0 do 0,4 g	99,83	99,75

lja na makadamu, a najmanja na asfaltnom putu. Podaci govore o tome da uslovi eksploatacije (vrsta puta, eksploataciona brzina) utiču na vertikalna ubrzanja okvira posmatranog vozila. Uočljivo je da se rezultati koji se odnose na pojedine deonice i celu dužinu puta razlikuju.

Na osnovu podataka iz tabele 1 može se utvrditi da se intervali srednjih vrednosti vertikalnih ubrzanja okvira kreću u granicama $\pm 0,3$ g u preko 99 % slučajeva, a amplituda u intervalu 0 do 0,4 g u preko 99 % slučajeva.

Primenom verovatnosnog papira za normalnu raspodelu potvrđeno je da se ubrzanja pokoravaju normalnoj raspodeli.

Vertikalna ubrzanja mostova

Na osnovu dvoparametarskih raspodela vertikalnih ubrzanja mostova definisani su podaci u tabeli 2.

Analizom je utvrđeno da vertikalna ubrzanja mostova pripadaju grupi stohastičkih procesa sa dvoznačnom, simetričnom promenom amplituda.

Podaci iz tabele 2 pokazuju da eksploatacioni uslovi utiču na veličinu vertikalnih ubrzanja mostova. Evidentno je da se i u ovom slučaju razli-

kuju rezultati koji se odnose na pojedine deonice i celu dužinu puta.

Najveća vertikalna ubrzanja (srednje vrednosti i amplitude) mostova ostvarena su na asfaltnom i makadamskom putu, pri čemu su ubrzanja na makadamskom putu veća.

Može se ustanoviti da su srednje vrednosti od $\pm 0,9$ g i amplitude od 0 do 3,3 g zastupljene u preko 99 % slučajeva.

Uz korišćenje verovatnosnog papira utvrđeno je da se srednje vrednosti i amplitude pokoravaju normalnom zakonu raspodele.

Na osnovu podataka iz tabela 1 i 2 može se uočiti da postoji razlika između vertikalnih ubrzanja okvira i posmatranih mostova. Ova pojava može se objasniti činjenicom da sistem za oslanjanje vrši prigušivanje, što je u skladu sa rezultatima koji se mogu dobiti dinamičkom simulacijom uz korišćenje vibracionih modela vozila [4, 6, 12, 13].

Podužne vibracije mostova

Analizom podataka utvrđeno je da podužna ubrzanja pogonskih mostova pripadaju grupi stohastičkih procesa sa simetričnom dvoznačnom raspodelom amplituda.

Tabela 2

Raspodela srednjih vrednosti i amplituda ubrzanja drugog (D) i trećeg (T) mosta

Vrsta puta	Intenzitet srednje vrednosti	Kumulat. učest. (%)		Intenzitet amplitude	Kumulat. učest. (%)	
		D	T		D	T
Asfalt	$\pm 0,9$ g	99,96	99,90	0 do 2,7 g	99,91	99,96
Makadam	$\pm 0,9$ g	99,92	99,87	0 do 3,3 g	99,93	99,80
Zemlj. put	$\pm 0,6$ g	99,97	99,97	0 do 1,8 g	99,99	99,99
Ledina	$\pm 0,6$ g	99,99	99,99	0 do 1,5 g	99,98	99,98
Zbirno	$\pm 0,9$ g	99,96	99,85	0 do 3,3 g	99,97	99,92

Raspodela srednjih vrednosti i amplituda podužnih ubrzanja drugog (D) i trećeg (T) mosta

Vrsta puta	Intenzitet srednje vrednosti	Kumulat. učest. (%)		Intenzitet amplitude	Kumulat. učest. (%)	
		D	T		D	T
Asfalt	$\pm 0,4$ g	99,92	99,99	0 do 0,55 g	99,88	99,97
Makadam	$\pm 0,4$ g	99,75	99,88	0 do 0,7 g	99,96	99,96
Zemlj. put	$\pm 0,3$ g	99,92	99,94	0 do 0,65 g	99,97	99,98
Ledina	$\pm 0,3$ g	99,97	99,97	0 do 0,5 g	99,97	99,99
Zbirno	$\pm 0,4$ g	99,87	99,94	0 do 0,7 g	99,98	99,98

Korišćenjem dvoparametarskih raspodela definisani su podaci dati u tabeli 3.

Na osnovu podataka iz tabele 3 može se ustanoviti da podužna ubrzanja mostova zavise od eksploatacionih uslova, a maksimalne vrednosti ostvarene su na makadamskoj i asfaltnoj podlozi. Značajno je da se i u ovom slučaju uoče razlike između rezultata koji se odnose na pojedine deonice i celu dužinu puta.

Očigledno je da su u preko 99 % slučajeva zastupljene srednje vrednosti podužnih ubrzanja od $\pm 0,4$ g i amplituda od 0,7 g.

Primenom verovatnosnog papira utvrđeno je da se srednje vrednosti i amplitude pokoravaju normalnoj raspodeli.

Napomene u vezi sa dobijenim rezultatima i njihovim korišćenjem u laboratorijskim uslovima

Analizom podataka dobijenih metodama klasiranja utvrđeno je da:

— vertikalna i bočna ubrzanja svih izmerenih veličina zavise od vrste puta i prosečne brzine kretanja vozila (uslova eksploatacije);

— jednoparametarske i dvoparametarske raspodele ukazuju na činje-

nicu da je najveća gustina raspodela izmerenih vibracija oko nultih srednjih vrednosti, što se može objasniti činjenicom da vozilo tokom eksploatacije ostvaruje vibracije oko ravnotežnog položaja, što je u skladu sa teorijom iz [4—6, 12, 13];

— vertikalna ubrzanja okvira i mostova, kao i podužna ubrzanja mostova, pokoravaju se normalnoj raspodeli,

— »zbirni« rezultati su dovoljno reprezentativni za laboratorijska ispitivanja, jer je struktura izabranih deonica obuhvatila sve karakteristične eksploatacione uslove posmatranog kamiona.

Utvrđene zakonitosti promena analiziranih veličina omogućavaju da se, na osnovu podataka iz tabela 1—3, u laboratorijskim uslovima, izvrše odgovarajuća ispitivanja. Međutim, simulacija u laboratorijskim uslovima može biti otežana, posebno zbog obezbeđenja istovetnosti pobuda u putnim i laboratorijskim uslovima, što dovodi do razlike u rezultatima [15]. Celishodno je da se za laboratorijska ispitivanja koriste blokovi opterećenja [10, 11, 14, 15, 17, 18], iako novija istraživanja kazuju na greške koje se pri tome javljaju. Svakako, najvažnije su one greške koje su posledica neodgovarajuće reprodukcije stvarnih opterećenja u laboratorijskim uslovima usled uproš-

ćenja koja se čine pri korišćenju blokova opterećenja [15].

Savremeni laboratorijski uređaji omogućavaju neposrednu reprodukciju slučajnih vremenskih zapisa opterećenja karakterističnih tačaka vozila, sa magnetofonske trake [18]. Pri tome se teži da razlike mernih veličina u putnim i laboratorijskim uslovima budu minimalne. To praktično znači da se, pod određenim uslovima, eksploataciona ispitivanja mogu zameniti laboratorijskim. Nepovoljna strana takvih uređaja ogleda se u činjenici da se pobude (sile, momenti i sl.) moraju reprodukovati uz korišćenje magnetnih pisaa, jer se radi o veoma dugačkim zapisima, koje nije lako zameniti digitalnim podacima (prvenstveno zbog ograničenih mogućnosti diskovog računara).

Imajući u vidu nedostatke laboratorijskih ispitivanja uz korišćenje blokova opterećenja, kao i probleme sa dužinama analognih zapisa karakterističnih veličina, smatra se da je povoljnije, na osnovu statistički obrađenih signala izvršiti generisanje odgovarajućih pobudnih opterećenja, u potrebnom vremenu trajanja. Međutim, sadašnji nivo obrade podataka [1, 2, 16] ne omogućava, na žalost, verodostojnu reprodukciju vremenskih signala opterećenja na osnovu poznatih parametara amplitudne identifikacije (dvo-parametarske i jednoparametarske raspodele). Zbog toga je povoljnije koristiti metode zasnovane na Furijeovoj analizi signala [1, 2], jer se na osnovu relativno malih datoteka Furijeove transformacije u kompleksnom obliku, primenom inverzne Furijeove transfor-

macije, mogu izračunati vremenske realizacije pobuda [1, 2]. Prednost ovakvog načina obrade rezultata jeste u činjenici da se uz pomoć personalnih računara mogu relativno jednostavno, generisati vremenske realizacije neophodne za laboratorijska ispitivanja.

Smatra se da ova metoda iziskuje kraće deonice za putna ispitivanja, jer je dužina signala ograničena minimalnom i maksimalnom učestanošću, a ne potrebnom dužinom deonice sa aspekta verodostojnosti pojave potrebnog broja amplituda. Pri tome treba imati u vidu i probleme koji mogu nastupiti pri definisanju reprezentativnog uzorka za laboratorijska ispitivanja, pa je ovu hipotezu neophodno proveriti u praksi upoređivanjem sa rezultatima koji se dobijaju u laboratorijskim uslovima neposrednim pobuđivanjima signalom sa magnetofonske trake.

Zaključak

Na osnovu izvršenih istraživanja razvijena je metodologija eksperimentalnog utvrđivanja stvarnih vibracionih opterećenja sistema specijalnog kamiona FAP i omogućila dobijanje neophodnih informacija za naknadne računске provere i ispitivanja. Dobijeni podaci pružaju dovoljno informacija za stvaranje blokova opterećenja za laboratorijska ispitivanja i proračun posmatranih sistema kamiona. U narednim istraživanjima treba posvetiti više pažnje postupcima obrade podataka zasnovanim na direktnoj i inverznoj Furijeovoj transformaciji.

Literatura:

- [1] Bendat, S. J., Piersol, A. G.: Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley-Interscience (Prevod na ruski), Mir, Moskva, 1974.
- [2] Bruel & Kjaer: Digital Signal Analysis. Selected Reprints from Technical Review, 1981.
- [3] Grubišić, V.: Criteria and Methodology for Lightweight Design of Vehicle Components subjected to Random Loads, SAE 850367, 1985.
- [4] Dmić, M.: Optimizacija oscilatornih sistema motornih vozila (monografija), Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1997.
- [5] Dmić, M., Pijevac, V. i dr.: Osnovi projektovanja teretnih motornih vozila, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1994.
- [6] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer, 1972.
- [7] Pijevac, V.: Jedan pristup u istraživanju proračuna nosećeg okvira motornog vozila pogonske formule 8x8 (magistarski rad), Mašinski fakultet, Sarajevo, 1988.
- [8] Popović, P.: Postupci simuliranja radnih opterećenja elemenata vozila, MVM 81/82, Kragujevac, 1988.

- [9] Popović, P.: Istraživanje režima radnih opterećenja vozila FAP 2832 BDS/A (Izveštaj), Centar za motore i vozila instituta Vinča, 1987.
- [10] Power, E., M.: Cycle Counting Methods and the Development of Block Load Fatigue Programmes, SAE 780102, 1978.
- [11] Rotenberg, R. V.: Podveska avtomobilja, Mašinstrojenje, Moskva, 1972.
- [12] Simić, D.: Dinamika motornih vozila, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [13] Todorović, J., Popović, P.: Uticaj rasipanja dinamičke izdržljivosti na pouzdanost elemenata vozila, NMV, 1981.
- [14] Todorović, J.: Ispitivanja motornih vozila, Mašinski fakultet, Beograd, 1973.
- [15] Vukadinović, S.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.
- [16] Direction du materiel SNCF — Departement des essais et des laboratoires: Methodes d'essais et de calcul d'endommagement des structures ferroviaries la SNCF, MEV3 9108, Paris, 1991.
- [17] Fiat: Lične informacije, 1982.
- [18] FAP Korporacija a.d.: Informacije, 1998.