



XIII

Međunarodni naučni simpozijum  
International Scientific Meeting

04.-06. 10.2004., Kragujevac

## **NAUČNI ODBOR**

**Predsednik:**

Ac. prof. dr Miroslav Demić, SCG

**Zamenik predsednika:**

Prof. dr Radivoje Pešić, SCG

**Sekretar:**

docent dr Jovanka Lukić, SCG

Prof. dr P. L. Ardoino, Italija

Prof. dr G. Belingardi, Italija

Prof. dr T. Gillespie, USA

Prof. dr K. Golec, Poljska

Dr. Ing. W. Gross, Nemačka

Prof. dr D. Gruden, Nemačka

Prof. dr Z. Lozia, Poljska

Prof. dr P. Lugner, Austria

Prof. dr J. Mrđa, Republika Srpska

Prof. dr V. Negrea, Rumunija

Ac. prof. dr V. E. Tolsky, Rusija

Prof. dr Z. Samaras, Grčka

Prof. dr C. Spentszas, Grčka

Prof. dr F. Časnji, SCG

Prof. dr Č. Duboka, SCG

Prof. dr R. Durković, SCG

Prof. dr A. Grujović SCG

Prof. dr A. Janković, SCG

Dr Z. Jovanović, naučni savetnik, SCG

Dr M. Kokić, viši naučni saradnik, SCG

Prof. dr B. Krstić, SCG

Dr Ž. Milić, naučni saradnik, SCG

Dr M. Milovanović, v. naučni savetnik., SCG

Prof. dr B. Nikolić, SCG

Prof. dr S. Petrović, SCG

Prof. dr D. Radonjić, SCG

Prof. dr R. Radonjić, SCG

Ac. prof. dr D. Simić, SCG

Prof. dr A. Stefanović, SCG

Prof. dr S. Veinović, SCG

## **ORGANIZACIONI ODBOR**

**Predsednik:**

mr Zoran Bogdanović, Institut za automobile ZA

**Zamenik predsednika:**

dr Milan Milovanović, Institut za automobile ZA

**Sekretar:**

Vesna Tiosavljević

mr Milosav Đorđević, Zastava vozila

Vladeta Kostić, Zastava automobili

dr Branislav Nedeljković, Zastava automobili

mr Srđan Nikezić, Zastava rezervni delovi

Slavoljub Ristić, Zastava Yugo sport

Branko Veljović, Zastava INPRO

Branislav Stojadinović, Institut za automobile

dr Dušan Nestorović, Institut za automobile

Milan Stanojević, Institut za automobile

Zoran Petrović, Institut za automobile

Dragan Begović, Institut za automobile

mr Dušan Puača, Regionalna privredna komora

prof. dr Milentije Stefanović, Mašinski fakultet Kragujevac

mr. Snežana Vrekić, Institut za automobile

Radomir Petrović, Zastava automobili

## **ORGANIZATORI SKUPA**

Katedra za motorna vozila i motore MFK

Časopis MVM

Zastava automobili - Institut za automobile

Zastava kamioni - IRJ TTR

Centar SANU, Kragujevac

JUMV

Skupština Grada Kragujevca

Regionalna privredna komora ŠiP

D. Miloradović\*, J. Glišović\*\*

## SPEKTRALNA ANALIZA OPTEREĆENJA SPONE PUTNIČKOG VOZILA PRI DEJSTVU NERAVNINA PUTOA

**Rezime:** U radu su prikazani i analizirani rezultati uslovne spektralne analize stohastičkog opterećenja spone sistema za upravljanje putničkog vozila nastalog usled dejstva neravnina puta. Eksperimentalni podaci snimljeni su uz pomoć mernih traka u obliku rozeta za merenje relativne deformacije spone, davača ubrzanja za merenje vertikalnih ubrzanja u centrima sva četiri točka i davača podužne brzine kretanja vozila. Ispitivanja su obavljena pri pravolinjskom kretanju vozila konstantnom brzinom, po različitim podlogama. Na osnovu snimljenih eksperimentalnih podataka, analiziran je uticaj vrste podloge i brzine kretanja vozila na opterećenje spone sistema za upravljanje.

**KLJUČNE REČI:** opterećenje spone, neravnine puta, uslovna spektralna analiza

## SPECTRAL ANALYSIS OF PASSENGER VEHICLE'S TIE-ROD LOADS DUE TO ROAD ROUGHNESS

**Abstract:** The results of conditioned spectral analysis of stochastic loads of passenger vehicle steering system's tie-rod due to road roughness are presented and analyzed in the paper. Experimental data are collected using strain gauges for measurement of tie-rod's relative deformation, acceleration transducers for measurement of vertical accelerations in the centers of all four wheels and longitudinal speed transducer. Investigations were carried out during straight-line, constant speed driving over different road surfaces. The influence of the type of the road and vehicle speed on the steering systems tie-rod loads is analyzed based on acquired experimental data.

**KEY WORDS:** tie-rod load, road roughness, conditioned spectral analysis

### 1. UVOD

Sistem za upravljanje, kao jedan od vitalnih sistema aktivne bezbednosti vozila, izložen je u eksploataciji složenim opterećenjima koja su, pre svega, izazvana dejstvom sila i momenata u kontaktu pneumatičko-momentom zaokretanja točka upravljača. Brojni uticajni parametri na vrstu i veličinu opterećenja sistema za upravljanje mogu se podeliti na: parametre proizvodnje (preciznost izrade i montaže elemenata, uravnoteženost točkova), konstruktivne parametre (konstruktivne karakteristike pneumatika, sistema elastičnog oslanjanja, prenosnog mehanizma sistema za upravljanje, krutost upravljačkog mehanizma sistema za upravljanje) i parametre eksploatacije (režim kretanja, brzina, konfiguracija puta, vrsta podloge). Posebna pažnja treba da se posveti realnim opterećenjima spone sistema za upravljanje, kao elementu koji ima odlučujući uticaj na preciznost i pouzdanost rada sistema za upravljanje.

Dosadašnja istraživanja opterećenja spone sistema za upravljanje, sprovedena pretežno uz učešće istraživača sa Mašinskom fakultet u Kragujevcu, bavila su se: modeliranjem opterećenja spone pomoću klasičnih mehaničkih modela sistema za upravljanje [8] i metode konačnih elemenata [4], laboratorijskim ispitivanjem i analizom maksimalnih opterećenja spone koja se javljaju pri zaokretanju upravljačkih točkova u mestu [4, 7, 8, 9], eksperimentalnim određivanjem opterećenja spone u putnim uslovima i njegovih statističkih karakteristika [2] i razvojem metoda ubrzanog laboratorijskog ispitivanja spone na izdržljivost [6].

U ovom radu biće prikazani rezultati uslovne spektralne analize realnih opterećenja spone usled dejstva neravnina puta. Eksperimentalni podaci snimljeni su u sklopu istraživanja [5] interakcije između sistema za

\* Mr Danijela Miloradović, asistent, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, neja@kg.ac.yu

\*\* Mr Jasna Glišović, asistent, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, jaca@kg.ac.yu

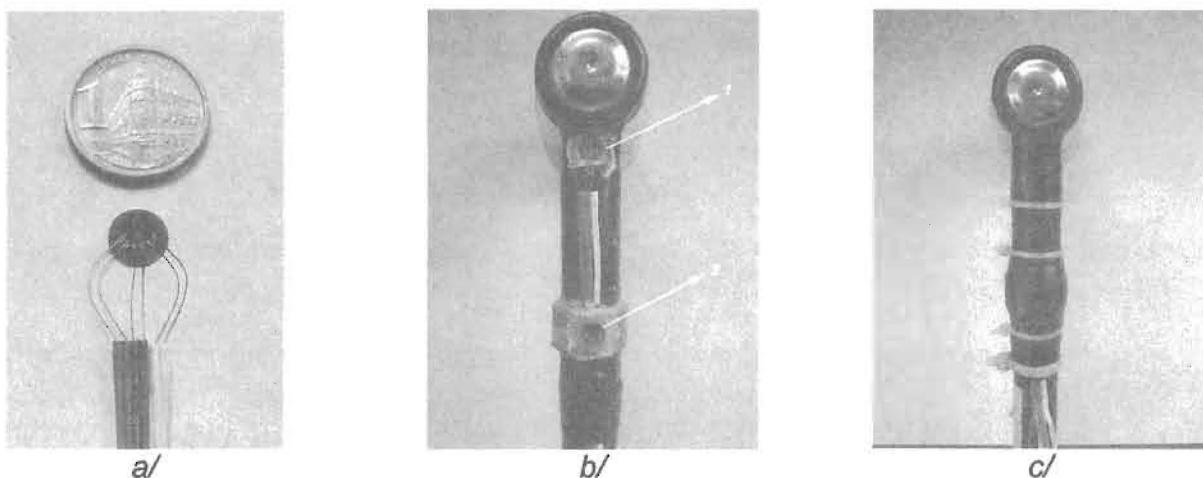
upravljanje i sistema za oslanjanje putničkih vozila. Ispitivanja su obavljena pri pravolinjskom kretanju vozila konstantnom brzinom po različitim vrstama podloga. Izvršena je uslovna spektralna analiza usvojenog modela sa četiri ulaza (vertikalna ubrzanja u centrima sva četiri točka) i jednim izlazom (normalni napon u poprečnom preseku leve spone sistema za upravljanje). Analiziran je uticaj brzine kretanja vozila i vrste podloge na opterećenje spone sistema za upravljanje odabranog putničkog vozila.

## 2. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE OPTEREĆENJA SPONE USLED DEJSTVA NERAVNINA PUTOA

Eksperimentalna istraživanja obavljena su na vozilu ZASTAVA FLORIDA 1.3 EFI koje se od serijske varijante vozila razlikuje po modifikovanim elementima prednjeg sistema elastičnog oslanjanja (umesto serijske poprečne vodice ugrađena je tzv. "TTR" vodica - kombinacija traverze i trougaone poprečne vodice) i točkovima (pneumatični Michelin Energy 175/60 R14 79T XT2, naplatci 5 Jx14).

Programom istraživanja predviđeno je merenje sledećih mernih veličina: relativne deformacije leve spone vozila, vertikalnih ubrzanja u centrima sva četiri točka vozila (kao ekvivalentnih pobuda od neravnina puta) i podužne brzine vozila. Merenja su obavljena pri pravolinjskom kretanju vozila, konstantnom brzinom, po različitim podlogama, bez uticaja bočnog vетра. Na taj način, uz pretpostavku da su prednji upravljački točkovi vozila pravilno uravnoteženi, obezbeđeno je da opterećenje spone potiče samo od neravnina puta, odnosno vertikalnih ubrzanja u centrima sva četiri točka.

Relativne deformacije leve spone sistema za upravljanje merene su pomoću minijaturnih rozeta firme Omega Engineering, Inc., tipa KFG-2-120-D17-11L1M2S, slika 1a. Primjenjene rozete imaju otpor merne rešetke od  $120[\Omega]$ , K-faktor jednak  $2.08 [-]$ , a uglovi rešetke su  $0/ 45^\circ/ 90^\circ$ .

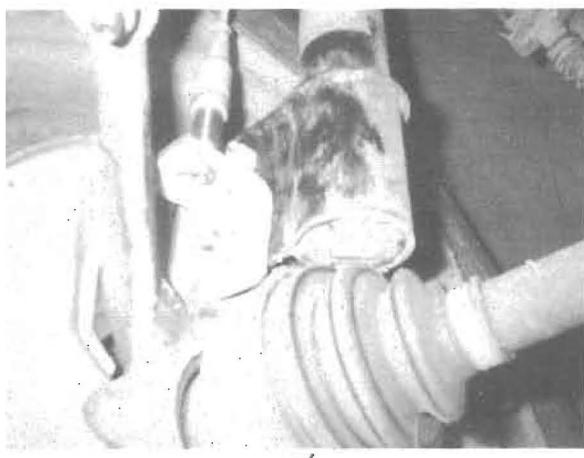


**Slika 1. Rozeta za merenje relativnih deformacija spone:**  
a/ izgled rozete, b/ način postavljanja aktivne (1) i kompenzacione rozete (2), c/ način zaštite

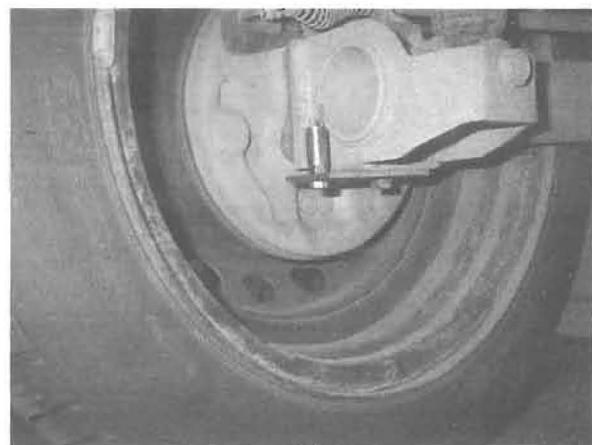
Na sponu sistema za upravljanje postavljene su dve rozete - jedna aktivna (merna), pozicija 1 na slici 1b, a druga kompenzaciona, pozicija 2 na slici 1b. Kompenzaciona roza je zaledljena na specijalno izrađenom prstenu - nosaču koji nije u direktnom kontaktu sa telom spone, već je za njega vezan pomoću trajno plastične zaptivne mase "Sintex 30". Na taj način, kompenzaciona roza se nalazi u neposrednoj blizini merne rozete, a zahvaljujući elastičnim osobinama "Sintex"-a, nije podvrgnuta naprezanjima koja vladaju u sponi.

Rozete su precizno zaledljene na memim mestima u skladu sa pravilima za pripremu površina i lepljenje mernih traka. Nakon lepljenja, rozete su zaštićene od spoljašnjih uticaja uz pomoć izolacione trake, slika 1c. Po jedna merna traka sa aktivne i kompenzacione rozete vezuju se u Wheatstone-ov polu-most i formiraju jedan kanal merno-pojačavačkog mosta KWS 673.A2. Informacije o naprezanju, odnosno relativnim deformacijama spone, dobijaju se preko tri polu-mosta, odnosno sa tri kanala merno-pojačavačkog mosta.

Ubrzanja u centrima svih točkova merena su uz pomoć induktivnih davača ubrzanja tipa HBM B12/200. Ovi davači imaju sopstvenu frekvenciju oscilovanja od  $200 [Hz]$  i vrednost nominalnog ubrzanja od  $200 [m/s^2]$ .



a/



b/

**Slika 2. Način postavljanja davača vertikalnog ubrzanja:**  
a/ u centru prednjeg točka, b/ u centru zadnjeg točka

Davači vertikalnog ubrzanja u centrima točkova postavljeni su na merna mesta uz pomoć dodatnih nosača, slika 2. Bitno je da se montiraju što bliže centru točka - da budu vezani za glavčine točkova i postavljeni u vertikalni položaj. Termine "vertikalni položaj" i "vertikalno ubrzanje" treba shvatiti uslovno - davači su kruto vezani za nosače točkova, pa se njihovo kretanje ne obavlja samo u vertikalnom pravcu. Međutim, kako su promene uglova i zatura točkova male, uticaj pravca merenja je praktično zanemarljiv.

Nosač davača ubrzanja u centru prednjeg točka zavrtnjem je čvrsto vezan za donju vezu amortizera sa glavčinom točka, slika 2a, dok je nosač davača ubrzanja u centru zadnjeg točka čvrsto vezan za glavčinu zadnjeg točka, na način prikazan na slici 2b. Rezonantne frekvencije nosača davača ubrzanja nalaze se u području iznad frekventnog opsega značajnog za analizu eksperimentalnih podataka.

Podužna brzina vozila merena je uz pomoć korelaciono-optičkog davača brzine Leitz Correvit - L2 Digital, prikazanog na slici 3. Davač je postavljen na zadnji deo vozila na mestu montiranja zadnjih registracionih tablica vozila. Merno područje davača brzine Leitz Correvit - L2 digital nalazi se između 3 [km/h] i 200 [km/h]. Davač zahteva napajanje jednosmernim naponom od 10 ÷ 16 [V].



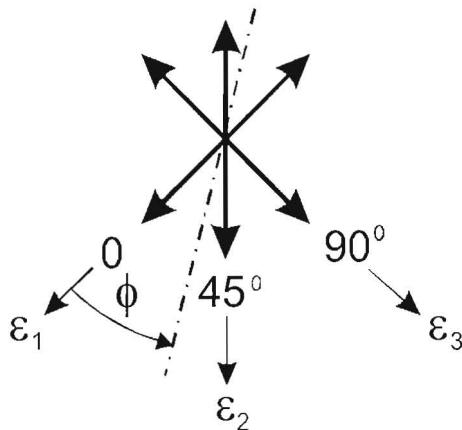
**Slika 3. Način postavljanja davača poduzne brzine vozila**

Konverzija analognih signala sa izlaza merno-pajačavačkih mostova u digitalni oblik obavlja se pomoću sistema za akviziciju podataka tipa Intelligent Instrumentation PCI-20000 firme Burr Brown. Akvizicija podataka podržana je od strane računara. Uzorkovanje je vršeno frekvencijom 100 [Hz], a ukupna dužina zapisa iznosiće je 30 [s]. Rezultati merenja u obliku diskretnizovanih vremenskih signala napona sa pojedinih davača smešteni se na hard disk računara u obliku datoteka i na raspolaganju su za naknadni pregled, obradu i analizu.

### 3. REZULTATI ANALIZE EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

#### 3.1 Analiza naprezanja spone pomoću rozeta sa mernim rešetkama pod uglovima $0/45^\circ/90^\circ$

Rozete zapepljene na levoj sponi mere vrednosti relativnih deformacija spone na mestu lepljenja aktivne rozete. Slika 4 ilustruje pravce dejstva relativnih naprezanja i njima pridružene oznake relativnih deformacija  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , za korišćeni tip rozeta sa tri merne rešetke pod uglovima  $0/45^\circ/90^\circ$ .



**Slika 4. Pravci merenja relativnih deformacija pomoću rozete sa mernim rešetkama pod uglovima  $0/45^\circ/90^\circ$**

U konkretnom slučaju, rozete su zapepljene tako, da se pravac relativne deformacije  $\varepsilon_2$  poklapa sa pravcem podužne ose spone, dok je referentni pravac - pravac relativnog naprezanja  $\varepsilon_1$ . Ugao  $\phi$ , u odnosu na koji deluje glavni normalni napon  $\sigma_1$ , određuje se u odnosu na referentni pravac.

Glavni normalni naponi,  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , računaju se na osnovu izraza (1) [3]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\mu} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}. \quad (1)$$

Pravci u kojima deluju glavni normalni naponi  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  mogu se odrediti korišćenjem geometrijskih zavisnosti između relativnih deformacija  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  i  $\varepsilon_3$  izmerenih pomoću rozete. Bez ulazeња u detalje teorijskih aspekata Mohr-ovog kruga napona, računa se, najpre, pomoćni ugao,  $\psi$ :

$$\psi = \arctg \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = \arctg \frac{A}{B}. \quad (2)$$

Način računanja ugla delovanja glavnih normalnih napona,  $\phi$ , uz pomoć izračunatog pomoćnog ugla  $\psi$ , a zavisno od znaka brojioca, A, i imenioca, B, izraza (2), prikazan je u tabeli 1.

**Tabela 1. Način računanja pravca glavnih normalnih napona,  $\phi$**

$A \geq 0, B > 0$	$A > 0, B \leq 0$	$A \leq 0, B < 0$	$A < 0, B \geq 0$
$\phi = \frac{1}{2}\psi$	$\phi = \frac{1}{2}(180^\circ - \psi)$	$\phi = \frac{1}{2}(180^\circ + \psi)$	$\phi = \frac{1}{2}(360^\circ - \psi)$

Ugao  $\phi$ , izračunat prema tabeli 1, meri se od referentne ose u matematički pozitivnom smeru i definiše pravac 1 glavnog normalnog napona  $\sigma_1$ . Pravac 2, koji odgovara glavnom normalnom naponu  $\sigma_2$ , nalazi se pod uglom  $\phi+90^\circ$  u odnosu na referentnu osu (u pozitivnom matematičkom smeru, takođe).

Glavni normalni naponi,  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , imaju maksimalnu i minimalnu vrednost u prvcima 1 i 2, respektivno. Tangencijalni napon u pomenutim prvcima jednak je nuli. U svim ostalim prvcima, normalni naponi uzimaju vrednosti između ove dve ekstremne vrednosti, a tangencijalni napon ima neku konačnu vrednost.

Vrednosti normalnih naponi,  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$ , u proizvoljnim prvcima  $x$  i  $y$ , pod uglom  $\alpha$ , odnosno  $\alpha + 90^\circ$ , u odnosu na glavnu osu, računaju se na osnovu izraza:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \\ \sigma_y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha\end{aligned}, \quad (3)$$

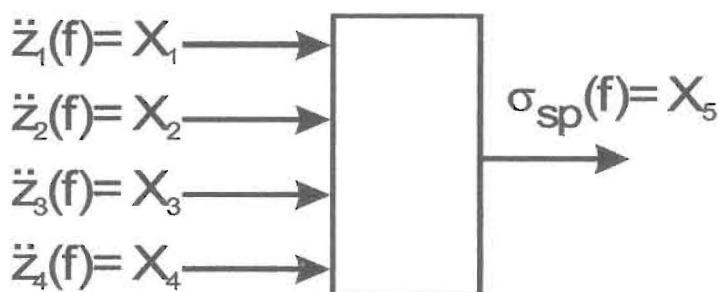
dok se tangencijalni naponi  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$  računaju na osnovu izraza:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha. \quad (4)$$

Vrednost normalnog napona u poprečnom preseku spone,  $\sigma_{sp}$ , računa se za ugao  $\alpha = 145^\circ$ , prema izrazu (3).

### 3.2 Algoritam za sprovođenje uslovne spektralne analize

Za potrebe analize, vozilo se predstavlja sistemom čiji su ulazi (pobude) neravnine puta, merene posredno preko vertikalnih ubrzanja u centrima sva četiri točka vozila:  $\ddot{z}_1$  - prednjem levom,  $\ddot{z}_2$  - prednjem desnom,  $\ddot{z}_3$  - zadnjem levom i  $\ddot{z}_4$  - zadnjem desnom točku vozila, a izlaz normalni napon u poprečnom preseku leve spone,  $\sigma_{sp}$ , (kao mera reakcije sistema za upravljanje). Slika 5 prikazuje posmatran model vozila u frekventnom domenu, sa četiri slobodno odabrana ulaza (u smislu izbora njihovog redosleda) i jednim izlazom.

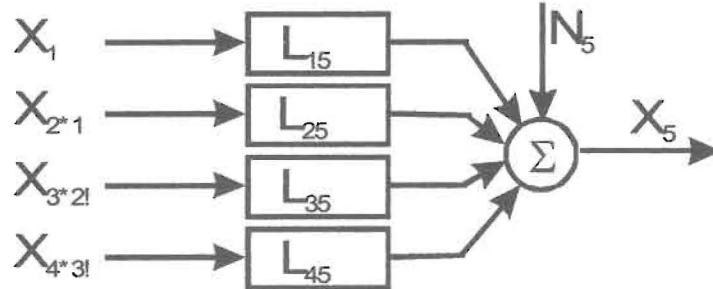


**Slika 5. Model sistema sa slobodno odabranim ulazima za proučavanje uticaja neravnina puta na opterećenje spone**

Nakon provere vrednosti običnih funkcija koherencije između svih ulaza i utvrđivanja da su vertikalna ubrzanja u centrima sva četiri točka vozila delimično spregnuti ulazi, model sa slike 5 prelazi u ekvivalentni model sa četiri nezavisna ulaza i jednim izlazom, slika 6. Prelazak na ekvivalentni model sa slike 6 moguć je nakon primene teorije uslovne spektralne analize [1], odnosno nakon rasprezanja ulaza.

Oznake merenih veličina sa slike 5 i 6, koje su korišćene pri daljoj obradi rezultata merenja su:  $\ddot{z}_i(f) = X_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  - spektri amplituda ubrzanja u centrima sva četiri točka,  $\sigma_{sp}(f) = X_5$  - spektr amplituda normalnog napona u poprečnom preseku spone,  $X_{i+j!}$ ,  $i = \overline{2,4}$ ,  $j = \overline{1,3}$  - uslovni spektri amplituda ulaza  $i$  iz

kojih su izdvojeni efekti ulaza 1 do  $j$ ,  $L_{ij}$ ,  $i = \overline{1,4}$  - optimalne funkcije frekventnog odziva prenosnih kanala sistema sa nezavisnim ulazima i  $N_5$  - spektar šuma (ostatka) na izlazu  $X_5$ .



**Slika 6. Ekvivalentni model sistema sa nezavisnim ulazima za proučavanje uticaja neravnina puta na opterećenje spone**

Teorijske osnove uslovne spektralne analize izložene u [1], poslužile su kao osnova za formiranje algoritma za sprovođenje uslovne spektralne analize primjenjenog u konkretnom razmatranom problemu.

Najpre, naizmenično se računaju optimalne funkcije frekventnog odziva sistema sa uslovnim (raspregnutim) ulazima,  $L_{ij}$ , i uslovni spektri snage ulaza  $i$  i  $j$  iz kojih su odstranjeni uticaji prvih  $r$  ulaza,  $S_{ij \cdot r!}$ , na sledeći način i prema sledećem redosledu:

$$\begin{aligned}
 L_{1j} &= \frac{S_{1j}}{S_{11}}, & j &= \overline{2,5} \\
 S_{ij \cdot 1!} &= S_{ij} - L_{1j} S_{i1}, & i &= \overline{2,5}, \quad j = \overline{i,5} \\
 L_{2j} &= \frac{S_{2j \cdot 1!}}{S_{22 \cdot 1!}}, & j &= \overline{3,5} \\
 S_{ij \cdot 2!} &= S_{ij \cdot 1!} - L_{2j} S_{i2 \cdot 1!}, & i &= \overline{3,5}, \quad j = \overline{i,5} \\
 &\dots \\
 L_{45} &= \frac{S_{45 \cdot 3!}}{S_{44 \cdot 3!}} \\
 S_{nn} &= S_{55 \cdot 4!} = S_{55 \cdot 4!} - L_{45} S_{54 \cdot 3!}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Sa  $S_{ij}$  su označeni obični auto- i kros-spektri snage, dok je sa  $S_{nn}$  označen auto-spektar snage ostatka na izlazu koji se računa kao uslovni auto-spektar snage izlaza iz kojeg su odstranjeni uticaji sva četiri ulaza.

Uslovni raspregnuti ulazi sistema dobijaju se na osnovu iterativne procedure prikazane izrazom (6):

$$\begin{aligned}
 X_{2 \cdot 1!} &= X_2 - \frac{S_{12}}{S_{11}} X_1 \\
 X_{3 \cdot 2!} &= X_3 - \frac{S_{13}}{S_{11}} X_1 - \frac{S_{23 \cdot 1!}}{S_{22 \cdot 1!}} X_{2 \cdot 1!} \\
 X_{4 \cdot 3!} &= X_4 - \frac{S_{14}}{S_{11}} X_1 - \frac{S_{24 \cdot 1!}}{S_{22 \cdot 1!}} X_{2 \cdot 1!} - \frac{S_{34 \cdot 2!}}{S_{33 \cdot 2!}} X_{3 \cdot 2!} \\
 N_5 = X_{5 \cdot 4!} &= X_5 - \frac{S_{15}}{S_{11}} X_1 - \frac{S_{25 \cdot 1!}}{S_{22 \cdot 1!}} X_{2 \cdot 1!} - \frac{S_{35 \cdot 2!}}{S_{33 \cdot 2!}} X_{3 \cdot 2!} - \frac{S_{45 \cdot 3!}}{S_{44 \cdot 3!}} X_{4 \cdot 3!}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Parcijalne funkcije koherence između uslovnih ulaza i izlaza računaju se na osnovu izraza (7):

$$\begin{aligned}\gamma_{15}^2 &= \frac{|S_{15}|^2}{S_{11}S_{55}} \\ \gamma_{25\cdot 1!}^2 &= \frac{|S_{25\cdot 1!}|^2}{S_{22\cdot 1!}S_{55\cdot 1!}} \\ \gamma_{35\cdot 2!}^2 &= \frac{|S_{35\cdot 2!}|^2}{S_{33\cdot 2!}S_{55\cdot 2!}} \\ \gamma_{45\cdot 3!}^2 &= \frac{|S_{45\cdot 3!}|^2}{S_{44\cdot 3!}S_{55\cdot 3!}}.\end{aligned}\quad (7)$$

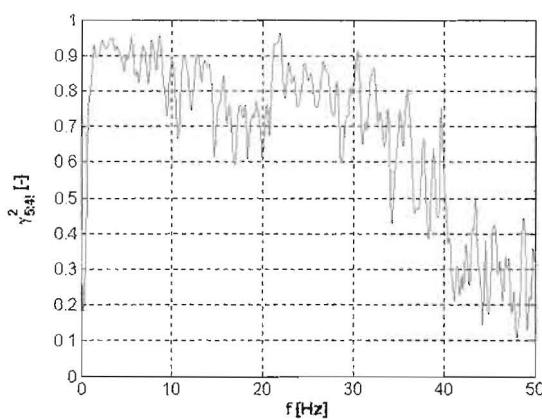
Višestruka funkcija koherence sistema sa četiri ulaza i jednim izlazom računa se na osnovu jednačine (8):

$$\gamma_{5\cdot 4!}^2 = \frac{S_{55} - S_{nn}}{S_{55}} = \frac{S_{55} - S_{55\cdot 4!}}{S_{55}}. \quad (8)$$

### 3.3 Rezultati uslovne spektralne analize opterećenja spone

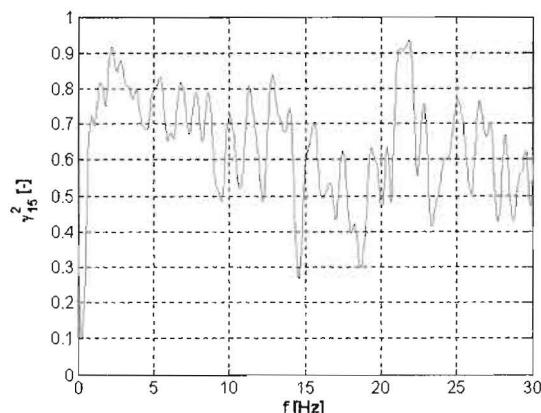
Na osnovu formiranog algoritma, jednačine (5) do (8), izvršena je uslovna spektralna analiza opterećenja spone pri pravolinijskom kretanju vozila različitim konstantnim brzinama (od 20 [km/h] do 80 [km/h]), po različitim vrstama podlage (auto-putu, asfaltu dobrog, srednjeg i lošeg kvaliteta). Ovde će biti prikazani rezultati analize opterećenja spone pri kretanju na auto-putu ( $v = 70$  [km/h] i  $v = 80$  [km/h]) i asfaltu lošeg kvaliteta ( $v = 80$  [km/h]).

Najpre je razmotrena višestruka funkcija koherence kao mera linearne zavisnosti između svih izmerenih ulaza i izlaza sistema, nezavisna od korelacije između ulaza. Na slici 7, prikazana je višestruka funkcija koherence za ulaze - vertikalna ubrzanja u centrima sva četiri točka vozila i izlaz - normalni napon u poprečnom preseku leve spone, izračunata pri kretanju vozila po auto-putu brzinom  $v = 70$  [km/h]. Funkcija pokazuje relativno visoke vrednosti u frekventnoj oblasti do 30 [Hz]. Vrednosti višestruke funkcije koherence bliske jedinici govore o tome da u pomenutoj oblasti praktično nema drugih (neobuhvaćenih) uticaja na opterećenje leve spone. Nagli pad vrednosti višestruke koherencije u frekventnoj oblasti iznad 30 [Hz] govori o postojanju i nekih drugih uticaja (šuma, nelinearnosti). U daljim razmatranjima će, kao relevantan, biti obuhvaćen frekventni opseg od 0 do 30 [Hz].

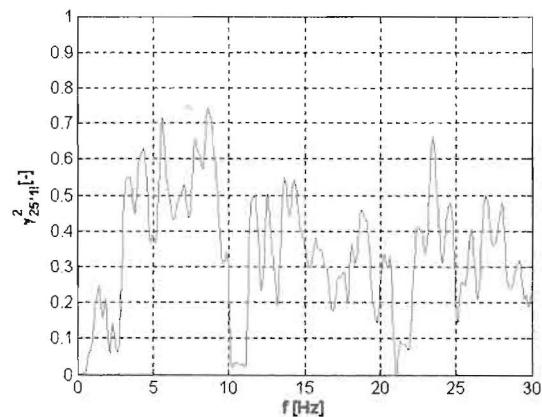


Slika 7. Višestruka funkcija koherence (auto-put,  $v = 70$  [km/h])

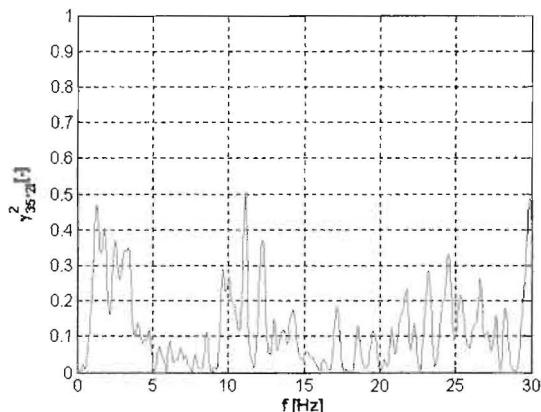
Parcijalne funkcije koherencije prenosnih kanala, pomažu da se utvrdi uzrok linearne zavisnosti koju opisuju obične funkcije koherencije. Na slici 8 prikazane su parcijalne funkcije koherencije za prenosne kanale "vertikalno ubrzanje u centru točka - normalni napon u poprečnom preseku leve spone" dobijene pri pravolinjskom kretanju vozila konstantnom brzinom  $v = 70$  [km/h] na auto-putu. Najveće vrednosti u posmatranom frekventnom opsegu pokazuju parcijalnu funkciju koherencije za ulaz - ubrzanje u centru prednjeg levog točka, što je i logično, imajući u vidu blizak međusobni položaj mernih mesta (direktna fizička veza). Uticaj drugih ulaza opada sa udaljenjem od mesta merenog izlaza, pa su i odgovarajuće vrednosti parcijalnih funkcija koherencije sve manje. Sa dijagrama se može izvesti zaključak da najveći uticaj da na opterećenje leve spone sistema za upravljanje imaju neravnine puta koje se preko prednjih točkova prenose na oslonjenu masu vozila, dok je uticaj neravnina puta ispod zadnjih točkova vozila, praktično, zanemarljiv.



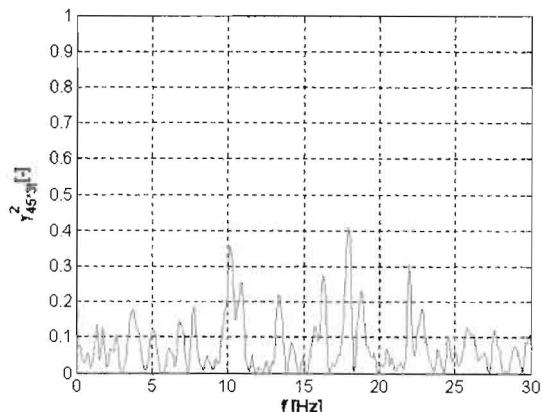
a/ Prenosni kanal  $X_1 \rightarrow X_5$



b/ Prenosni kanal  $X_{2*1!} \rightarrow X_5$



c/ Prenosni kanal  $X_{3*2!} \rightarrow X_5$

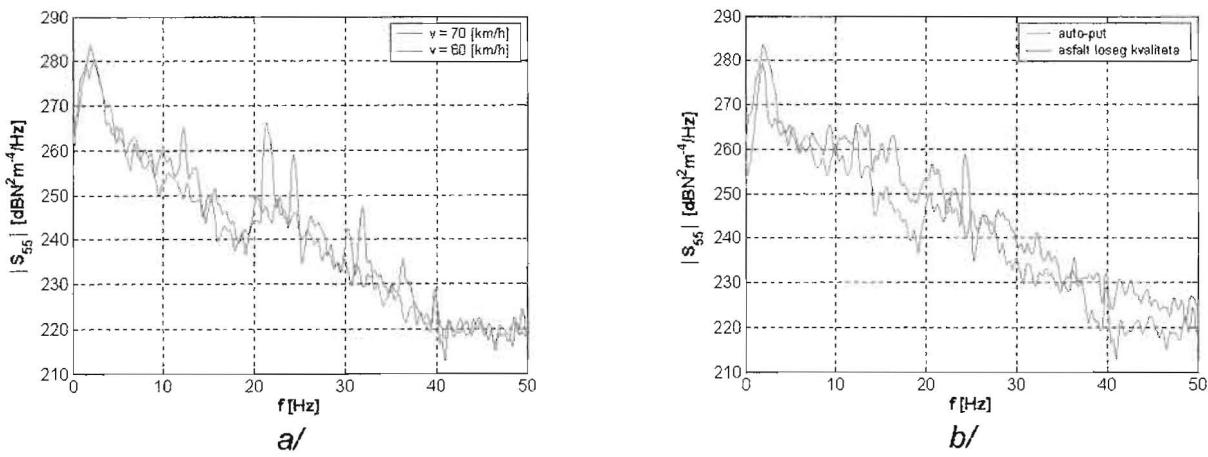


d/ Prenosni kanal  $X_{4*3!} \rightarrow X_5$

**Slika 8. Parcijalne funkcije koherencije (auto-put,  $v = 70$  [km/h])**

U cilju utvrđivanja uticaja brzine kretanja vozila i vrste podloge na veličinu opterećenja spone, izračunati su auto-spektri snage signala normalnog napona u poprečnom preseku spone za pravolinjsko kretanje vozila različitim brzinama po auto-putu, slika 9a/, i pravolinjsko kretanje vozila brzinom  $v = 80$  [km/h] po auto-putu i asfaltu lošeg kvaliteta, slika 9b/.

Pri kretanju vozila po auto-putu, odnosno po ravnoj podlozi sa malim visinama neravnina puta, promena brzine sa 70 [km/h] na 80 [km/h] donosi male promene intenziteta opterećenja spone. Sa dijagrama sa slike 9a/ vidljive su izrazite tri vršne vrednosti opterećenja spone (osnovna i viši harmonici) koje se javljaju na frekvencijama zavisnim od brzine vozila. U literaturi [6], ova se pojava vezuje samo za kretanje vozila po putevima I klase i objašnjava se neuniformnošću pneumatika. Vrhovi pojedinih harmonika pomereni su ka višim frekvencijama, srazmerno povećanju brzine kretanja vozila. Primetna je i značajna vrednost opterećenja spone na frekvencijama bliskim sopstvenoj frekvenciji oslonjene mase vozila (1-3 [Hz]).

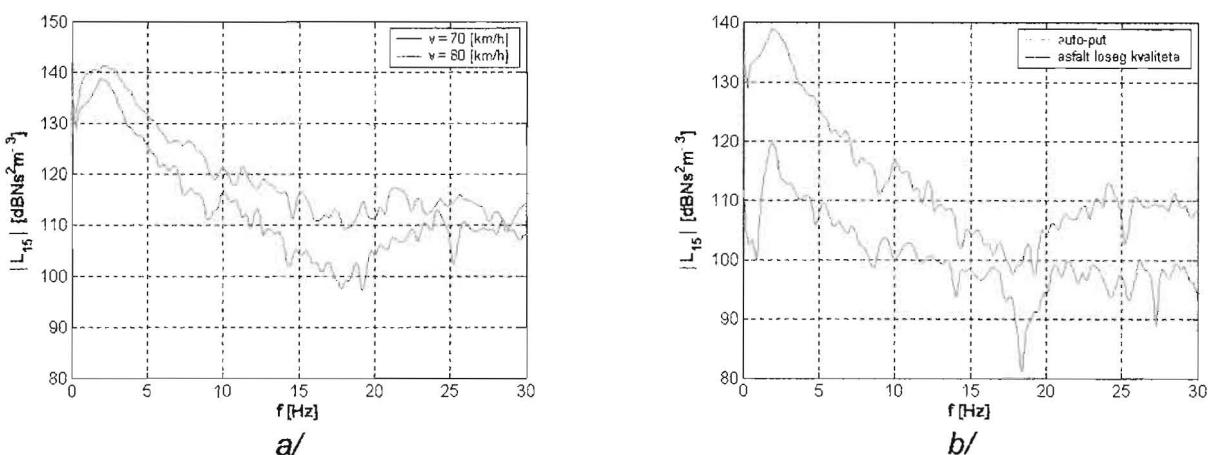


**Slika 9. Amplitude spektra snage normalnog napona u poprečnom preseku spone:**  
 a/ uticaj brzine kretanja (podloga: auto-put), b/ uticaj vrste podloge ( $v = 80 \text{ [km/h]}$ )

Uticaj vrste podloge na veličinu amplituda spektra snage normalnog napona u poprečnom preseku spone može se sagledati sa dijagrama na slici 9b/. Pri kretanju vozila istom brzinom, lošiji kvalitet podloge u najvećem delu spektra (osim u oblasti sopstvene frekvencije oslonjene mase) izaziva veće vrednosti amplituda normalnog napona. Pri kretanju vozila po asfaltu lošeg kvaliteta ne postoje tako izražene vršne vrednosti opterećenja, osim u domenu sopstvenih frekvencija oslonjene mase.

Da bi se ispitao uticaj brzine kretanja na tok funkcije frekventnog odziva, upoređeni su rezultati merenja pri kretanju vozila po pravolinijskoj deonici auto-puta brzinama 70 [km/h] i 80 [km/h]. Na slici 10a/ prikazan je uticaj brzine kretanja na amplitudno-faznu karakteristiku (AFK) optimalne funkcije frekventnog odziva za prenosni kanal "vertikalno ubrzanje u centru prednjeg levog točka - normalni napon u poprečnom preseku leve spone". Povećanje brzine kretanja izaziva smanjenje vrednosti amplituda optimalne funkcije frekventnog odziva za posmatrani prenosni kanal.

Uticaj vrste podloge na veličinu intenziteta funkcije frekventnog odziva pri pravolinijskom kretanju vozila konstantnom brzinom od 80 [km/h] ilustrovan je dijagramom na slici 10b/. Nameće se zaključak da je intenzitet funkcija frekventnog odziva veći na podlogama boljeg kvaliteta (auto-put) nego na podlogama lošijeg kvaliteta (asfalt lošeg kvaliteta).



**Slika 10. AFK optimalne funkcije frekventnog odziva kanala  $X_1 \rightarrow X_5$ :**  
 a/ uticaj brzine kretanja (podloga: auto-put), b/ uticaj vrste podloge ( $v = 80 \text{ [km/h]}$ )

## 4. ZAKLJUČAK

Putna ispitivanja opterećenja spone putničkog vozila pri dejstvu neravnina puta, odnosno pri pravolinijskom kretanju vozila konstantnom brzinom po podlogama različitog kvaliteta, pokazala su da visine neravnina puta (merene posredno, preko vertikalnih ubrzanja u centrima točkova vozila) pokazuju intenzivan uticaj na normalni napon u poprečnom preseku leve spone u frekventnom domenu do 30 [Hz]. Najveći uticaj pokazuju neravnine puta čiji se uticaj preko prednjeg levog točka prenosi na sponu.

Brzina kretanja vozila utiče na vrednosti intenziteta spektra snage normalnog napona, posebno na vrednost frekvencija pri kojima se javljaju izražene vršne vrednosti opterećenja spone pri kretanju vozila po autoputu. Većim brzinama kretanja odgovaraju manje vrednosti intenziteta optimalnih funkcija frekventnog odziva kanala "vertikalno ubrzanje u centru točka - normalni napon na sponi".

Vrsta podloge utiče na veličinu intenziteta spektra snage normalnog napona u sponi. Lošije podloge izazivaju pojavu većih normalnih napona na sponi pri kretanju vozila istom, konstantnom brzinom. Takođe, lošije podloge smanjuju intenzitet optimalne funkcije frekventnog odziva kanala "vertikalno ubrzanje u centru točka - normalni napon na sponi".

## 5. LITERATURA

- [1] Bendat J., Piersol A.: "Engineering applications of corelation and spectral analysis", A Wiley - interscience Publication, John Wiley & Sons, 1980, New York
- [2] Golubović D., Simić D., Savić R.: "Rezultati eksperimentalnog određivanja stohastičkog opterećenja upravljačkog mehanizma automobila", Časopis "Motorna vozila i motori", God. XVI, Broj 92/93, 1990., Kragujevac, str. 67 - 74
- [3] Hoffmann K.: "An Introduction to Measurements using Strain Gauges", Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989., Darmstadt
- [4] Kojić M., Savić R., Nikolić V.: "Analiza naponskog stanja i deformacija u zglobu spone puničkog vozila primenom metode konačnih elemenata i eksperimentalne metode, pri statičkom opterećenju", Časopis "Motorna vozila i motori", God. VIII, Broj 46/47, 1982., Kragujevac, str. 84 - 100
- [5] Miloradović D.: "Interakcija između sistema za upravljanje i sistema za oslanjanje putničkih vozila", Magistarski rad, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2004., Kragujevac
- [6] Simić D., Savić R.: "Analiza opterećenja spone putničkog automobila i metod ubrzanog laboratorijskog ispitivanja", Časopis "Motorna vozila i motori", God. XIV, Broj 80, 1988., Kragujevac, str. 33 - 54
- [7] Simić D., Savić R., Golubović D.: "Analiza opterećenja spona automobila pri okretanju točka upravljača u mestu", Časopis "Motorna vozila i motori", God. XIII, Broj 75/76, 1987., Kragujevac, str. 16 - 28
- [8] Simić D., Savić R., Knapczyk J.: "Matematičko-mehanički model za analizu geometrije i sila mehanizma za vešanje i upravljanje automobila Z-101 u statičkim uslovima", Časopis "Motorna vozila i motori", God. XIV, Broj 78/79, 1988., Kragujevac, str. 12 - 31
- [9] Stojadinović B., Živadinović A., Milenković P., Radonjić R., Savčić A.: "Definisanje režima opterećenja za laboratorijska ispitivanja sistema za upravljanje", Zbornik radova VIII simpozijuma "Motorna vozila i motori", 1994., Kragujevac, str. 417-422