

ULOGA SIGNALA TORZIONIH VIBRACIJA KOLJENASTOG VRATILA U DIJAGNOSTICI MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Petrović M.¹

¹Mašinski fakultet Sarajevo, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Sažetak: Sofisticirani sistemi mjerenja i upravljanja termoenergetskim sistemima sve se više primjenjuju i kod motora SUI. Prednosti koje se njihovom primjenom ostvaruju, svakim danom su veće, a potencijal ovih sistema nije još iscrpljen. Korištenjem jednog takvog sistema, u obliku beskontaktnog davača za mjerenje kutne brzine i položaja koljenastog vratila, otvaraju se mogućnosti praćenja i dijagnosticiranja rada motora SUI na relativno jednostavan i jeftin način. Praćenjem promjena kutne brzine koljenastog vratila, te njegovim odgovarajućim vrednovanjem, mogu se dobiti pouzdane informacije o stanju SUI motora. S jedne strane to znači da je moguće ustanoviti neispravnosti u njegovom radu, a s druge strane da se mogu ustanoviti čak i uzroci takvog rada.

Ključne riječi: Motor SUI, torzione vibracije, dijagnostika

Abstract: Sophisticated systems of measurement and control of thermoenergetic systems are finding greater application at IC engines. The advantages accomplished by their use are becoming greater every day and the potential of these systems is far from being used up. Using such a system, in the form of contact-free sensor for angular velocity and crankshaft location measurement, is opening up possibilities for tracking and diagnostics of the IC engine work in a relatively simple and inexpensive way. Monitoring the changes of crankshaft's angular velocity and its appropriate assessment, reliable information about IC engine condition can be obtained. On the one hand, it means that it is possible to determine irregularities in its operation, and on the other, even the causes of such operation can be determined.

Keywords: IC engine, torsional vibrations, diagnostics

1. UVOD

Razvoj motora s unutarnjim izgaranjem (SUI) sve veće snage, sa što manjom potrošnjom goriva i što manjom emisijom štetnih materija, zahtijeva uvođenje novih sustava i metoda kod praćenja, regulacije i dijagnosticiranja njegovog rada, odnosno određivanja veličina koje će to omogućiti.

Mjernom tehnikom danas možemo na jednostavan, jeftin i precizan način beskontaktno izmjeriti kutnu brzinu i položaj koljenastog vratila. Budući da je promjena kutne brzine koljenastog vratila posljedica stanja u motoru, adekvatna obrada ovog parametra trebala bi dati uvid u

najvažnije procese u SUI motoru. Kretanje je vrlo složeno budući da je karakter kutnog kretanja koljenastog vratila uvjetovan prije svega karakterom okretajnog momenta, promjenjivošću otpornog momenta radnog stroja i svojstvima dinamičkog sustava (koljenastog vratila). Temeljito poznavanje obilježja ovih veličina, uz postavljanje odgovarajućih modela, stvara osnovu za simuliranje specifičnih procesa koji se javljaju pri eksploataciji motora SUI.

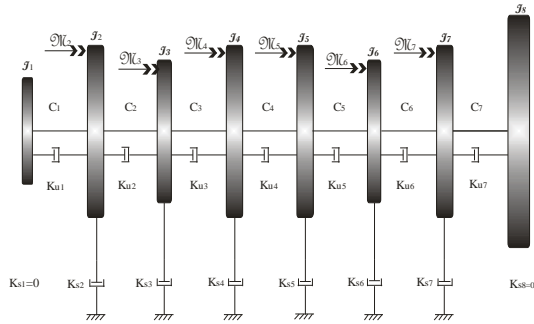
U sklopu ovog rada predočeni su rezultati istraživanja torziona-oscilatornih fenomena SUI motora. Predstavljene su i mogućnosti njihove primjene te uzroci anomalija koje se mogu pojaviti pri radu.

2. EKVIVALENTNI DINAMIČKI SUSTAV MOTORA SUI I RJEŠENJA JEDNADŽBE KRETANJA

Promatranjem bilo kojeg sustava s ciljem analize i matematičke interpretacije procesa rada, zbog ograničenosti spoznaje i zbog vrlo često kompliciranog matematičkog aparata koji prati njegovo izvorno predstavljanje, nužno je u praksi razviti jednostavnije ekvivalentne sustave. Oni istodobno s dovoljnom točnošću oslikavaju događaje u stvarnom sustavu.

Motor SUI je vrlo složen sustav kojeg karakteriziraju različiti interdisciplinarni fenomeni. Pored osnovne konstrukcije SUI motora koju čine krivuljni mehanizam (klip, klipnjača, koljenasto vratilo), glava s razvodnim organima, blok motora, uljno korito itd., za njegov ispravan rad potrebno je mnogo dodatnih sustava i agregata. To je oprema motora (sustav za dobavu goriva, sustav za paljenje, sustav za podmazivanje, remenski prijenosnici, zamašnjak, zupčasti prijenosnici i sl.). Svi ovi sustavi utječu na oscilatorno stanje krivuljnog mehanizma SUI motora.

U sklopu istraživanja torziona-oscilatornih fenomena motora SUI pokazalo se više puta [4, 5, 7] da je tzv. linijski ekvivalentni sustav optimalno rješenje. On je jednostavan i daje vrlo prihvatljive rezultate proračuna, bliskih događanjima u stvarnom sistemu. Na slici 1. prikazan je ekvivalentni dinamički sustav linijskog, šesterocilindričnog, četverotaktnog, prehranjivanog, vodom hlađenog dizelskog motora namijenjenog teškim teretnim cestovnim vozilima. U tabeli 1. prikazane su vrijednosti osnovnih parametara razmatranog sustava.



Slika 1. Ekvivalentni dinamički sustav motora SUI

Slika 1. prikazuje ekvivalentni sustav koji se sastoji iz koncentriranih masa u obliku diskova s momentima inercije \mathcal{J} , međusobno povezanih elastičnim vratilima bez mase krutosti c , unutarnjim prigušenjem K_u i vanjskim prigušenjem K_s . Diskovi su mase stvarnog sistema: disk 1 - remenica i oprema motora koja se pokreće preko remena; disk 2 - prvi cilindar; disk 3 - drugi cilindar; disk 4 - treći cilindar; disk 5 - četvrti cilindar; disk 6 - peti cilindar; disk 7 - šesti cilindar; disk 8 - zamašnjak i oprema motora svedena na zamašnjak (zupčasti pogon uljne pumpe, razvodni mehanizam itd.).

Tabela 1. Karakteristične vrijednosti parametara ekvivalentnog dinamičkog sustava

Disk	Moment inercije \mathcal{J} [kgm ²]	Krutost c [Nm/rad]	Vanjsko prigušenje K_s [Nms/rad]
1	0,02767	4,3236 x 10 ⁶	0
2	0,147	2,8083 x 10 ⁶	12
3	0,08346	2,8083 x 10 ⁶	12
4	0,147	2,8083 x 10 ⁶	12
5	0,147	2,8083 x 10 ⁶	12
6	0,08346	2,8083 x 10 ⁶	12
7	0,147	4,119 x 10 ⁶	12
8	1,8724		0

Diferencijalne jednadžbe kretanja pojedinih diskova mogu se opisati kao za i -ti disk (Lagrange-ove jednadžbe druge vrste):

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \left[\frac{1}{2} \mathcal{J}_i(\alpha_i) \dot{\alpha}_i^2 \right]}{\partial \dot{\alpha}_i} \right] - \frac{\partial \left[\frac{1}{2} \mathcal{J}_i(\alpha_i) \dot{\alpha}_i^2 \right]}{\partial \alpha_i} + \\ & + \frac{\partial}{\partial \alpha_i} \left[\frac{1}{2} c_{i-1} (\alpha_i - \alpha_{i-1})^2 + \frac{1}{2} (\alpha_i - \alpha_{i+1})^2 \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial \alpha_i} \left[\frac{1}{2} K_{u,i-1} (\alpha_i - \alpha_{i-1})^2 + \frac{1}{2} K_{u,i} (\alpha_i - \alpha_{i+1})^2 + K_{s,i} \alpha_i^2 \right] = M_i^*(\alpha_i) \end{aligned} \quad (1)$$

Uvođenjem zamjene za kutno okretanje koljenastog vratila u obliku $\alpha_i = \omega_i t + \mathcal{G}_i$, uz pretpostavku da je $\omega_i = const.$ i razvojem funkcija $\mathcal{J}_i(\alpha_i)$, $\frac{d\mathcal{J}_i(\alpha_i)}{d(\alpha_i)}$, $\mathcal{M}_i(\alpha_i)$ u okolini točke $\omega_i t$ u Taylor-ov red, uz odbacivanje članova višeg reda i konstantnih veličina koje ne utječu na oscilatorno stanje sustava, jednadžba (1) se može pisati u obliku:

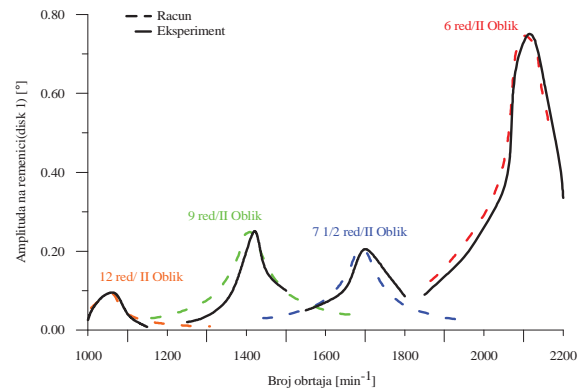
$$\begin{aligned} & \mathcal{J}_i \ddot{\mathcal{G}}_i + K_{s,i} \dot{\mathcal{G}}_i + K_{u,i-1} (\dot{\mathcal{G}}_i - \dot{\mathcal{G}}_{i-1}) + K_{u,i} (\dot{\mathcal{G}}_i - \dot{\mathcal{G}}_{i+1}) + \\ & + c_{i-1} (\mathcal{G}_i - \mathcal{G}_{i-1}) + c_i (\mathcal{G}_i - \mathcal{G}_{i+1}) = \mathcal{M}_i \end{aligned} \quad (2)$$

Pravilnom identifikacijom pojedinih parametara razmatranog sustava te određivanjem njihovih veličina [1, 2, 3, 4], moguće je riješiti sustav diferencijalnih jednadžbi tipa jednadžbe (2) koja opisuje njegovo kretanje. Matricni oblik glasi:

$$[\mathcal{J}] \ddot{\mathcal{G}} + [K_s] \dot{\mathcal{G}} + [K_u] \Delta \dot{\mathcal{G}} + [c] \Delta \mathcal{G} = \{\mathcal{M}\}, \quad (3)$$

gdje je \mathcal{G} kut uvijanja, $\dot{\mathcal{G}}$ i $\ddot{\mathcal{G}}$ odgovarajući izvodi kuta uvijanja, a $\Delta \dot{\mathcal{G}}$ razlika brzina uvijanja susjednih diskova, dok je \mathcal{M} moment pobude sustava.

Verifikacija pristupa svođenja stvarnog sustava na ekvivalentni sustav, identifikacije parametara sustava te potvrda primijenjenog matematičkog modela za predmetni motor, ispitivan na probnom stolu, obavljena je na temelju usporedbe amplituda osciliranja na remenici (disk 1) dobivenih računskim putem (slika 2.)



Slika 2. Amplitude osciliranja na remenici (disk 1) za srednje brzohodni prehranjivani dizelski motor

Sa slike 2. uočljiva su vrlo dobra slaganja između eksperimenta i proračuna, ali se u praksi kada je potrebna vrlo jednostavna i brza analiza, odnosno dijagnostika rada SUI motora, ovakav pristup ne može iskoristiti. Problem je u kompliciranim mjerenjima koja zahtijevaju posebnu mjernu opremu te prethodno ispitivanje isključivo na probnom stolu. Takav pristup je nužan i opravdan pri promatranju oscilatornih fenomena motora SUI u fazama njegove konstrukcije, kao i pri izboru dodatnih elemenata u obliku prigušivača torzionih

oscilacija, gdje je potrebno SUI motor ispitati po pravilima rada.

Za dijagnosticiranje rada motora dovoljno je promatranje, odnosno mjerenje kutne brzine jednog od diskova ekvivalentnog sustava. Korištenjem beskontaktnih metoda za mjerenje kutne brzine na bazi inkrementalnih davača, dobiva se informacija koja omogućava analiziranje stanja, odnosno utvrđivanje ispravnosti rada SUI motora. Poznavanjem promjene kutne brzine, tj. kutnog pomicanja promatranog diska ekvivalentnog sustava pri ispravnom radu, utvrđivanje neispravnosti u radu samo je stvar usporedbe „ispravnog“ s dobivenim signalom. Iako se na taj način dobiva potvrda o ispravnosti ili neispravnosti rada motora SUI, ne dobiva se informacija o tome što je uzrok neispravnog rada. Mogući uzroci neispravnosti rada motora mogu se podijeliti u dvije grupe:

- mehaničke greške na sustavu (napuknuća, mehanička oštećenja, nedostatak ulja za podmazivanje itd.),
- greške u termodinamičkom procesu (promjena kuta predubrizgavanja, nefunkcioniranje regulatora dobave goriva, izostanak zapaljenja goriva itd.).

Za poznavaoce osobina motora - promjena pobude (tlaka) u motoru, promjena krutosti pojedinih dijelova motora i promjena prigušenja u pojedinim dijelovima motora – one se mogu prepoznati na snimljenom dijagramu kutne brzine, odnosno kuta osciliranja koljenastog vratila motora. Spomenuti fenomeni mogu se identificirati i odgovarajućim softverima koji kao temelj koriste sustav jednadžbi (3).

Korištenjem prikladnog ekvivalentnog modela dinamičkog sustava, pravilnom identifikacijom i definiranjem parametara modela, te prikladnim rješavanjem jednadžbe kretanja (3), dobiva se vrlo efikasan alat za predviđanje ponašanja dinamičkih sustava.

Rezultati proračuna prikazani u ovom radu bazirani su na numeričkoj metodi središnjih razlika, a kao alat za programiranje korišten je softver MatLab.

U nastavku rada prikazani su primjeri proračuna dinamičkog sustava koji se odnose na najčešće susretane uzroke neispravnosti rada motora SUI.

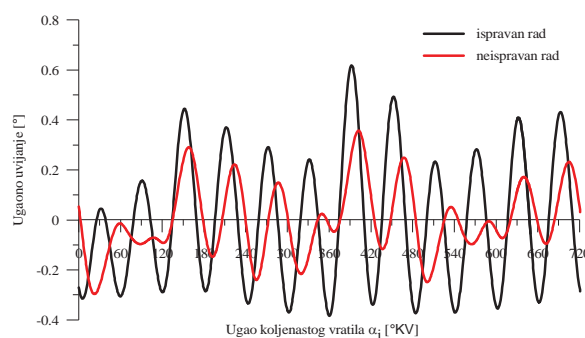
3. SIMULACIJA UZROKA NEISPRAVNOSTI RADA MOTORA SUI

Današnji razvoj motora SUI nezamisliv je bez primjerenih simulacijskih modela koji ga ubrzavaju, uz istodobno smanjenje troškova. Nerijetko se susreću sustavi koji posjeduju funkciju samodijagnosticiranja, gdje sustav prepoznaje neispravnosti u radu koje tada i korigira. U specijalnim slučajevima to može biti prekid rada sustava da ne nastanu veća oštećenja.

U sklopu ovog rada analizirani su ekstremni slučajevi pri radu motora SUI, a koji se mogu pojaviti u praksi.

3.1. Napuknuća koljenastog vratila

Napuknuća koljenastog vratila motora SUI su najčešće uzrokovana torzionim oscilacijama i čine jedan od kvarova koji se ne može direktno identificirati. Matematički gledano, napuknuća koljenastog vratila mogu se opisati promjenom, tj. smanjenjem krutosti određenog elementa sustava, odnosno odsječka vratila u ekvivalentnom dinamičkom sustavu. Na slici 3. prikazani su rezultati proračuna u slučaju napuknuća koljenastog vratila, kao i njihova usporedba s ispravnim SUI motorom. Korišten je broj okretaja motora 2100 min^{-1} , koji je rezonantni broj okretaja.

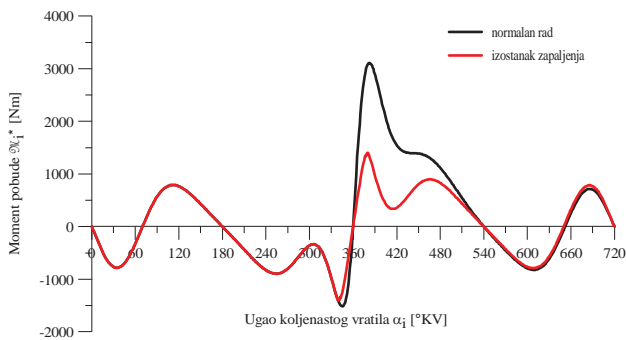


Slika 3. Kutno uvijanje oko ravnotežnog ugla okretaja na mjestu remenice (disk 1) razmatranog SUI motora s mikropukotinama na koljenastom vratilu pri 2100 min^{-1}

Iz krivulje kutnog pomicanja kod ispravnog motora jednoznačno se može utvrditi vrsta i broj cilindara. U vremenu od 360°KV izraženo je šest polaznih točaka što pokazuje da je riječ o četverotaktnom, šesterocilindričnom SUI motoru. Odstupanja krivulje kutnog pomicanja u slučaju napuknuća koljenastog vratila u odnosu na izvornu krivulju, vidi se da je posrijedi neko oštećenje na sustavu koje je izazvalo smanjenje krutosti. Time se smanjila karakteristična frekvencija osciliranja oko ravnoteže, a došlo je i do smanjenja amplituda kutova uvijanja, što upućuje na pomicanje položaja rezonantnog režima rada motora.

3.2. Izostanak zapaljenja u cilindrima

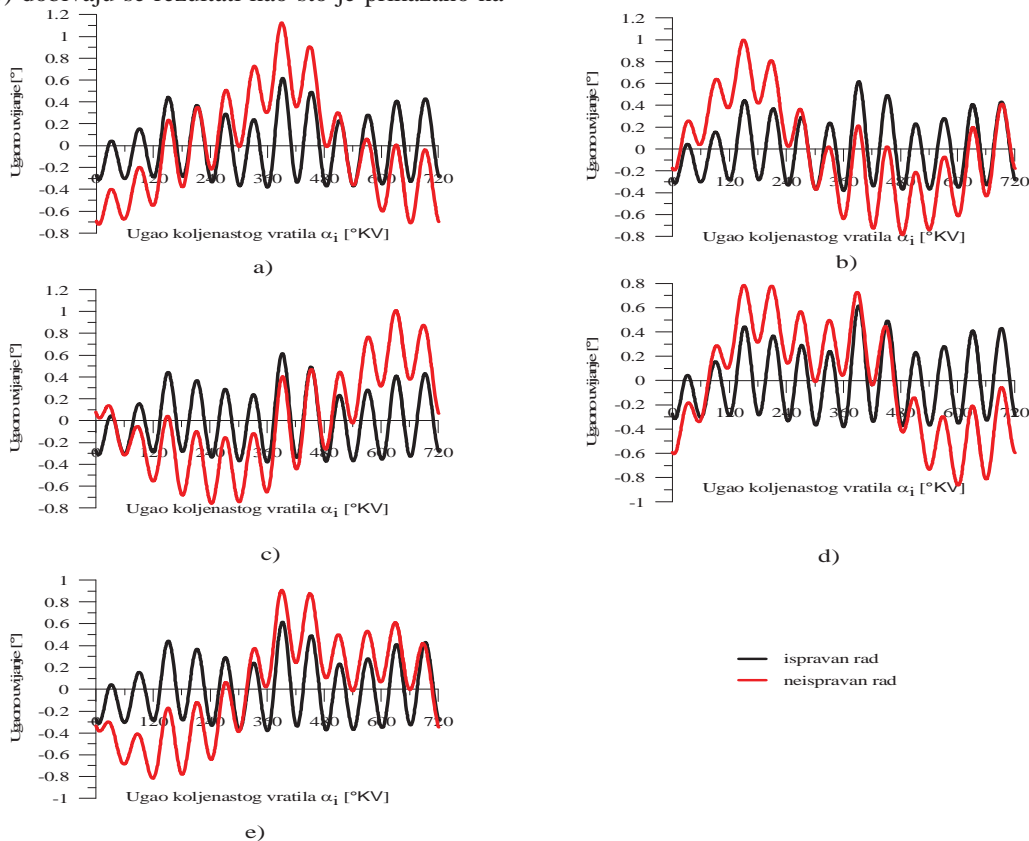
Izostankom zapaljenja u cilindru, indicirani tlak u motoru će se svesti isključivo na tlak čiste kompresije jer neće doći do oslobađanja vezane kemijske energije goriva putem sagorijevanja. To znači da će i dio okretajnog momenta $\mathcal{M}_i^*(\alpha_i)$, dobivenog na temelju tog tlaka, imati drukčije vrijednosti. Na slici 4. uspoređen je pobudni moment u cilindru motora SUI u slučaju izostanka paljenja s odgovarajućim momentom pri normalnom radu motora.



Slika 4. Pobudni moment SUI motora od jednog cilindra pri normalnom radu i pri izostanku paljenja pri 2100 min^{-1}

Kao što se vidi sa slike 4., razlika je u periodu sagorijevanja i ekspanzije u datom cilindru, dok je intenzitet krivulje u vremenu obavljanja preostalih taktova gotovo jednak normalnom radu motora.

Uvođenjem trenutka pobude $\mathcal{M}_i^*(\alpha_i)$ u jednadžbu kretanja (3) dobivaju se rezultati kao što je prikazano na

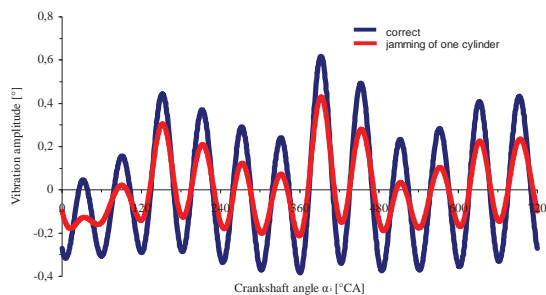


Slika 5. Kutna pomicanja remenice (disk 1) razmatranog motora SUI u slučaju izostanka paljenja u a) prvom, b) drugom, c) trećem, d) prvom i drugom, e) prvom i trećem cilindru pri 2100 min^{-1}

3.3 Slučaj zaribavanja cilindra

Zaribavanje cilindara uvjetovano je trenjem polumokrih ili suhih dodirnih površina između cilindarske košuljice i klipa. Slučaj „zaribavanja“ jednog sklopa (klip–cilindar) manifestira se velikim povećanjem otpora kretanja klipa i povećanjem otpora uslijed osciliranja. Primjer

zaribavanja na jednom cilindru motora vidi se na slici 6. Rezultati na slici 6. pokazuju da je osciliranje (kutno pomicanje) nepromijenjeno, samo su smanjene apsolutne vrijednosti amplitude uvijanja. To je posljedica povećanja otpora osciliranju zbog zaribavanja nekog od cilindara.



Slika 6. Usporedni dijagram kuta uvijanja remenice (disk 1) razmatranog SUI motora kod ispravnog rada i sa zaribavanjem jednog cilindra

Prikazani primjeri simuliranja torzionog osciliranja koljenastog vratila motora kod njegove neispravnosti baza su podataka koja služi za identifikaciju potencijalnih grešaka na motoru.

4. ZAKLJUČAK

Mjerenje trenutačne kutne brzine i položaja koljenastog vratila motora SUI beskontaktnim metodama, korištenjem inkrementalnih davača, pruža jeftinu i snažnu alternativu za otkrivanje nepravilnosti u njegovom radu. Ako se uzme u obzir da se kod modernih SUI motora otvaraju i mogućnosti njihove serijske ugradnje, važnost analize signala trenutačne kutne brzine i položaja koljenastog vratila postaje još izraženiji.

U članku je prikazana mogućnost simuliranja pojedinih anomalija u radu motora SUI na temelju ekvivalentnog torziona–oscilatornog sustava, te model za rješavanje jednadžbi kretanja takvog sustava. Dobiveni rezultati ukazuju na veliki potencijal takve metode dijagnosticiranja rada motora SUI. Ona može, uz odgovarajuću bazu podataka analiziranih pojedinačnih slučajeva, dati iskaz o uzrocima eventualnih neispravnosti u radu.

Iz prikazanih rezultata proračuna, krivulje kutnog uvijanja su glatke krivulje dobivene matematičkim putem. Prilikom njihovog korištenja treba uzeti u obzir način obrade izvornog signala davača. Zbog smetnji u signalu čiji uzroci mogu biti kvaliteta davača, prijenosnih veza, mjernog lanca i sl., prilikom njegove obrade treba imati na umu da je motor SUI kružni stroj koji vezanu

kemijsku energiju goriva putem procesa sagorijevanja pretvara u mehanički rad. Sama stohastičnost procesa sagorijevanja izaziva odstupanja između izmjerenih vrijednosti po pojedinim ciklusima. Prije usporedbe sa simuliranim karakteristikama, potrebno je promatrati više mjerenih uzastopnih ciklusa te zatim napraviti selekciju po frekvencijama koje su mogući nositelji smetnji.

5. LITERATURA

- [1] Doleček V., Filipović I., Bibić Dž., “Istraživanje karakteristika unutrašnjeg trenja viskoelastičnih elemenata u torziono – oscilatornom sistemu”, 04-39-3840-1/04, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2005
- [2] Doleček V., Filipović I., Bibić Dž., Petrović M.: “Possibilities of Indirect Control of Combustion Process Parameters at IC Engines”, *Proceedings of the International Congress Motor Vehicles and Motors*, 2006, Kragujevac, Serbia, 71
- [3] Doleček V., Petrović M.: “Combustion Analysis and Diagnostics of Diesel Engine by Monitoring of Instantaneous Angular Velocity”, *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské*, Technical University Ostrava, Vol. 1, 2008, pp 98-103
- [4] Hafner E. K., Mass H., „*Theorie der Triebwerksschwingungen der Verbrennungskraftmaschine*“, Springer-Verlag Wien - New York A, 1984
- [5] Hafner K. E., Mass H., „*Torsionsschwingungen in der Verbrennungskraftmaschine*“, Springer-Verlag Wien - New York A, 1985
- [6] Moskwa J. J., Bucheger D. J., “A New Methodology for Use in Engine Diagnostics and Control, Utilizing „Synthetic“ Engine Variables: Theoretical and Experimental Results“, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 123, september 2001, pp 528-534
- [7] Taraza D., „Estimation of the Mean Indicated Pressure from Measurements of the Crankshaft Angular Speed Variation“, *SAE paper 932413 USA*, 1993

Kontakt:

Marin Petrović
Mašinski fakultet Sarajevo
Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo
petrovic@mef.unsa.ba