

Ivan Filipović, Dževad Bibić

ISSN 0350-350X

GOMABN 49, 4, 334-351

Izvorni znanstveni rad / Original Scientific Paper

UDK 621.822.573.004.14 : 519.283.001.57 : 621.436.75 : 621.4.016.4 : 532.135 : 621.891.275 :

UTJECAJ VISKOZNOSTI ULJA NA FUNKCIONALNE VELIČINE KLIZNIH LEŽAJEVA MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Sažetak

Klizni ležajevi na radilici motora s unutarnjim izgaranjem, a posebno na letećim rukavcima, jako su opterećeni elementi. Zbog toga je za njihovo pravilno funkcioniranje potrebno pažljivo definirati radne uvjete, gdje je kvaliteta ulja jedan od vrlo bitnih čimbenika. S aspekta rada kliznih ležajeva bitno je osigurati minimalnu promjenu vizkoziteta ulja u širokom radnom području motora. Izbor ulja s gledišta fizikalnih osobina, u prvom redu odgovarajućeg viskoznosti, ima važno mjesto u području smanjenja gubitaka kod kliznih ležajeva, odnosno povećanju učinkovitosti motora.

U radu je obrađen utjecaj viskoznosti ulja za podmazivanje na radne uvjete kod letećeg rukavca jednog dizelovog motora s predtlačenjem namijenjenog za ugradnju u vozila. Analizirani su parametri: temperatura ulja u ležaju, promjena maksimalne vrijednosti srednjeg tlaka u ulju, minimalni nosivi sloj ulja i udio mješovitog trenja, a sve u funkciji viskoznosti ulja na ulazu u ležaj, pri različitim zazorima sklopa ležaj – rukavac. Prikazani rezultati su dobiveni korištenjem modela i vlastito razvijenih računskih programa za simulaciju uvjeta rada kliznih ležajeva uz eksperimentalnu potvrdu korištenog modela.

Ključne riječi: viskoznost ulja, klizni ležaj, dizelov motor

1. Uvod

Pred današnji razvoj motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI) u osnovi se postavlja nekoliko glavnih ciljeva:

- smanjenje emisije onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima i buke,
- povećanje ekonomičnosti transformacije unutarnje energije goriva u mehanički rad na izlazu motora s unutarnjim izgaranjem i
- primjena nekonvencionalnih goriva.

Postizanje prethodnih ciljeva, uz stalno poštovanje zakonskih ograničenja emisije onečišćujućih tvari i buke, kao i stalno smanjenje specifične potrošnje goriva, zahtijevalo je:

- masovno uvođenje predtlačnih motora s visokim stupnjem tlačenja zraka iza kompresora i varijabilnom geometrijom na ulazu u turbinu i
- sve veći broj elektronički kontroliranih procesa na motoru (mehatronički sustavi na motoru i njegovoj opremi).

Korištenje nadpunjenja s većim stupnjem tlačenja zraka, pored niza prednosti, prouzrokovalo je povećanje mehaničkih i termičkih opterećenja motora, posebno klipnog mehanizma, što je sa stajališta konstrukcija motora nepovoljno. Klizni ležajevi motora sa unutarnjim izgaranjem, zbog povećanih mehaničkih opterećenja i odgovarajućih konstruktivnih zahvata na radilici motora, postali su ugroženi sa stajališta njihovog funkcioniranja. Ovo se posebno odnosi na klizne ležajeve na letećim rukavcima radilice motora, koji su izloženi najvećim opterećenjima. Povećano mehaničko opterećenje na motoru, nastalo forsiranjem snage motora (sve veća specifična snaga motora), praćeno konstruktivnim zahvatima na radilici motora, neminovno dovodi do smanjenja odnosa širine i promjera ležaja povećanja temperature ulja za podmazivanje, itd. Ovo upućuje na zaključak, da je za ispravan rad kliznih ležajeva neophodno izvršiti optimiranje, i to:

- konstruktivnih karakteristika ležajeva (dimenzije, zazor) i
- karakteristika sustava za podmazivanje (vrsta ulja, protok ulja, ulazna temperatura ulja, itd.).

U ovom radu je data analiza funkcionalnih veličina kliznog ležaja letećeg rukavca nadpunjenog dizelovog motora za teretna vozila usporedno s funkcionalnim veličinama glavnog ležaja, u kontekstu promjene viskoznosti ulja za podmazivanje. U analizi utjecaja viskoznosti ulja na funkcionalne veličine rada kliznog ležaja, korištene su metode modeliranja sa vlastito razvijenim računskim programima, uz odgovarajuće potvrde ovih rezultata na osnovi eksperimentalnih istraživanja.

2. Model za određivanje parametara kretanja rukavca u ležaju

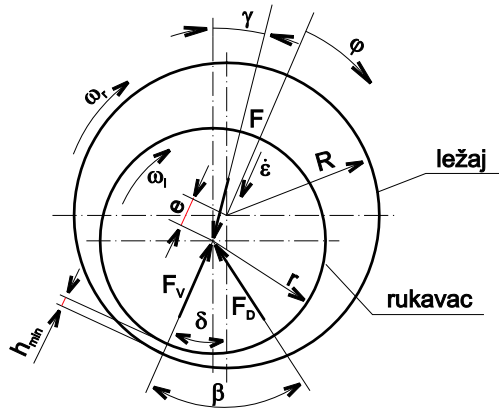
Fizikalni model sustava rukavac-ležaj dan je na slici 1 sa svim važnim parametrima. Najvažniji parametri za definiranje radnih uvjeta sklopa rukavac-ležaj su:

- raspored tlaka ulja u ležaju,
- temperatura ulja u ležaju i
- ekscentricitet ležaja.

Za proračun ovih parametara, a prema fizikalnom modelu na slici 1, uvedene su pretpostavke:

- ulje je viskozni Newtonov fluid s konstantnom viskoznošću u odgovarajućem trenutku,
- tečenje je laminarno, bez inercije,
- površine rukavca i ležaja su glatke i apsolutno krute.

Koristeći jednadžbe o održavanju mase i količine kretanja, za tečenje fluida u procjepu ležaja, uz navedene pretpostavke može se dobiti poznata Reynoldsova jednadžba hidrodinamičkog plivanja rukavca u obliku:



Slika 1: Fizikalni model rukavac-ležaj s označenim karakterističnim veličinama

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left[(1 + \varepsilon \cos \varphi)^3 \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} \right] + \left(\frac{2R}{B} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[(1 + \varepsilon \cos \varphi)^3 \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{z}} \right] =$$

$$= 6 \frac{\partial}{\partial \varphi} (1 + \varepsilon \cos \varphi) + \frac{12}{\bar{\omega}} \frac{\partial}{\partial t} (1 + \varepsilon \cos \varphi) \quad (1)$$

gdje je: $\Pi = \frac{\rho \psi^2}{\eta \bar{\omega}}$ - bezdimenzionalni tlak

ρ - tlak u ulju

$\varepsilon = \frac{e}{R - r}$ - relativni ekscentricitet

$\bar{\omega} = \omega_r + \omega_l - 2 \frac{\partial \delta}{\partial t}$ - efektivna kutna brzina

$\bar{z} = \frac{z}{B/2}$ - bezdimenzionalna koordinata po širini ležaja

$\psi = \frac{R - r}{R}$ - relativni zazor

$D = 2R$ - unutarnji promjer ležaja

B - širina ležaja,

η - dinamička viskoznost ulja

φ - ugao okretanja

δ - kutni položaj minimalnog sloja ulja

r - polumjer rukavca

z - koordinata po širini ležaja

t - vrijeme

Na osnovi ravnoteže vanjskog opterećenja (sila F) i sila tlaka u ulju mogu se napisati jednačbe koje definiraju ekscentricitet rukavca kao:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \frac{F\psi^2}{BD\eta S_{OV}} \left[\cos(\delta - \gamma) - \frac{\sin(\delta - \gamma)}{\operatorname{tg}\beta} \right] \quad (2)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{2} \left[(\omega_r + \omega_l) - \frac{F\psi^2}{BD\eta S_{OD}} \frac{\sin(\delta - \gamma)}{\sin\beta} \right] \quad (3)$$

gdje je: $S_{OV} = \frac{F_V\psi^2}{BD\eta\dot{\varepsilon}}$ - Sommerfeldov broj za translaciju

$$S_{OD} = \frac{F_D\psi^2}{BD\eta\bar{\omega}}$$
 - Sommerfeldov broj za rotaciju

F_V i F_D - rezultirajuće sile od tlaka ulja u ležaju zbog translacije i rotacije.

Zbog pretpostavke o konstantnosti viskoznosti ulja s jedne strane i nepouzdanosti graničnih uvjeta s druge strane, u ovakvim modelima se obično ne koristi jednačba energije u izvornom obliku za računanje trenutne temperature ulja. U ovakvim modelima zadovoljavajući pristup je postavljanje bilance topline na ulazu i izlazu iz ležaja, gdje se toplota proizvedena trenjem u ležaju odvodi uljem (zanemaren odvod topline kroz ležaj i rukavac). Na osnovi ovog može se definirati srednja temperatura ulja u ležaju kao:

$$\mathcal{G}_{sr} = \mathcal{G}_1 + \frac{\mu F D \bar{\omega}}{4 \dot{Q} \rho c_p} \quad (4)$$

gdje je: \dot{Q} - protok ulja kroz ležaj

μ - koeficijent trenja koji se najčešće uzima iskustveno za uvjete

hidrodinamičkog plivanja (μ) i uvjete mješovitog trenja (μ_m)

c_p - specifična toplota ulja

\mathcal{G}_1 - temperatura ulja na ulazu u ležaj

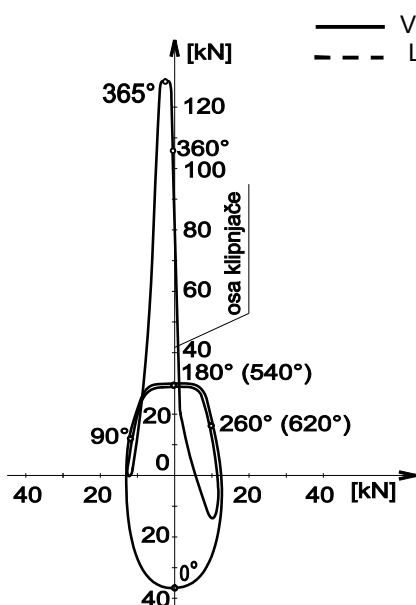
ρ - gustoća ulja

Korelacija između koeficijenta trenja za hidrodinamičko podmazivanje i mješovito podmazivanje korištena je iz [4]; kao:

$$\mu_m = \mu \left(2,25 \frac{h_o}{h_{\min}} + 3 \right) \quad (5)$$

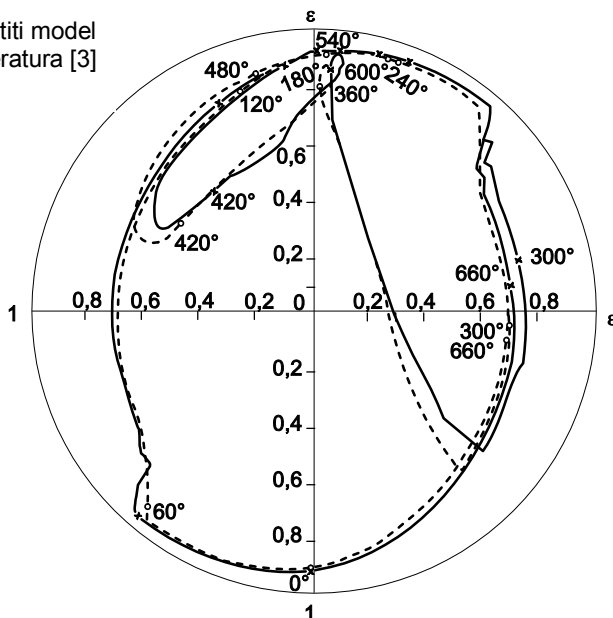
gdje je: h_o - zbroj maksimalnih visina neravnina na ležaju i rukavcu,
 h_{\min} - minimalna debljina uljnog filma.

Opterećenje letećeg rukavca je izračunato za konkretan slučaj nadpunjenog dizelovog motora pri brzini vrtnje $n = 2200 \text{ }^\circ/\text{min}$ i maksimalnoj snazi. Rezultati su prikazani u vidu polarnog dijagrama opterećenja gdje je koordinatni sustav vezan za klipnjaču, slika 2.



Slika 2: Polarni dijagram opterećenja letećeg rukavca (koordinatni sustav vezan za klipnjaču)

— Vlastiti model
 - - - Literatura [3]



Slika 3: Polarni dijagram ekscentriciteta letećeg rukavca (koordinatni sustav vezan za klipnjaču)

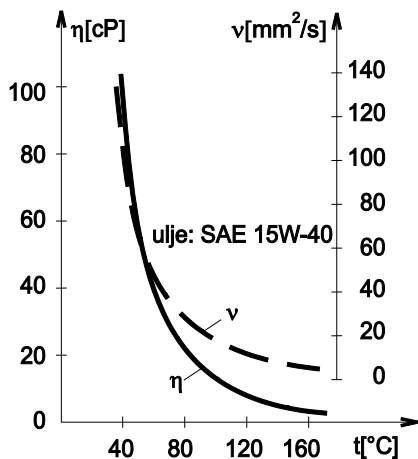
Sustav jednadžbi (1), (2), (3) i (4) je spregnut i može se riješiti numerički na način opisan u [2, 3]. S obzirom da su početni uvjeti nepoznati, oni se pretpostave u prvom koraku računanja, a nakon završnog proračuna uspoređuju se s rezultatima na kraju ciklusa. Ako je velika razlika između pretpostavljenih i izračunatih rezultata u danom ciklusu, korigiraju se ulazni podaci s odgovarajućim rezultatima na kraju ciklusa. Ovaj se postupak, poznat kao iterativni, ponavlja dok se ne dobije zadovoljavajuće odstupanje između pretpostavljenih vrijednosti na početku računanja ciklusa i

odgovarajućih rezultata na kraju ciklusa. Prezentirani model je verificiran preko polarnog dijagrama ekscentriciteta danog na slici 3, usporedno s odgovarajućim rezultatima danim u literaturi [3], za broj okretaja motora $n = 2200$ o/min i kinematičku viskoznost ulja na ulazu u ležaj $v = 23,6$ mm²/s.

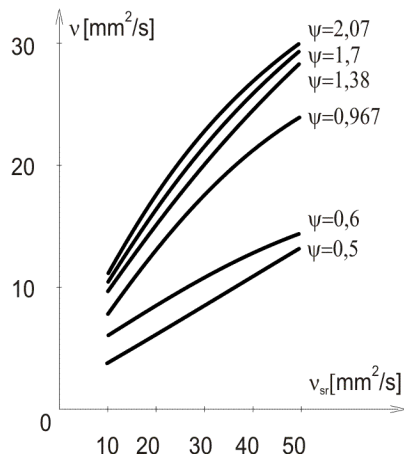
Slaganje rezultata dobivenih vlastitim računskim programom s rezultatima iz [3] je zadovoljavajuće što upućuje na zaključak da se koristeći prethodni model, mogu analizirati utjecaji različitih radnih uvjeta na funkcionalne veličine rada kliznih ležajeva.

3. Analiza rezultata

Za provedenu analizu korišten je leteći ležaj srednje brzohodnog dizelovog motora kao najopterećeniji ležaj čiji je relativni zazor $\psi_l = 0,6$ ‰. Usporedno su dati i neki rezultati za glavni ležaj istog motora s relativnim zazorom $\psi_g = 0,967$ ‰. Ulje za podmazivanje, korišteno u analizama je SAE 15W-40 čiji parametri kinematičke (v) i dinamičke (η) viskoznosti su mjereni u Rafineriji ulja Modriča i prikazani na slici 4. Koristeći jednadžbu (4) i sliku 4, na slici 5 je dat usporedni dijagram viskoznosti ulja (v_{sr}) u ležaju, definiran na osnovi srednje temperature (ϑ_{sr}) ulja u ležaju, i viskoznosti ulja na ulazu u ležaj (v) za različite relativne zapore ležaja (ψ).



Slika 4: Dijagram kinematičke (v) i dinamičke (η) viskoznosti ulja u funkciji temperature ulja (t) pri tlaku $p \approx 1$ bar



Slika 5: Odnos viskoznosti ulja na ulazu u ležaj (v) i srednje viskoznosti ulja u ležaju (v_{sr}) za različite zapore (ψ)

Zbog uzimanja realnog utjecaja tlaka ulja na viskoznost, koristeći i rezultate mjerenja na slici 4, u analizama je korištena korelacija za dinamičku viskoznost ulja SAE 15W-40 u obliku:

$$\eta = ae^{\left(\frac{b}{c+\vartheta} + \frac{d}{e+\vartheta} p_{sr}\right)} \quad [Pa \cdot s] \quad (6)$$

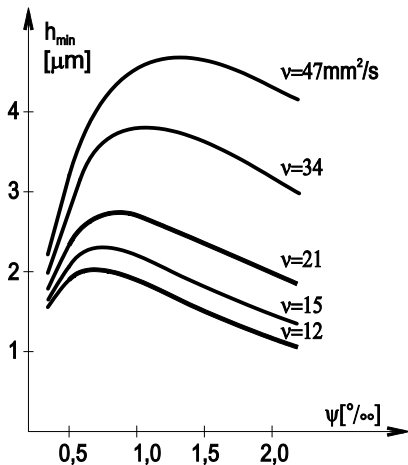
gdje je: $\vartheta [^{\circ}C]$ - temperatura ulja

$p_{sr} [Pa]$ - srednji projekcijski tlak u ulju

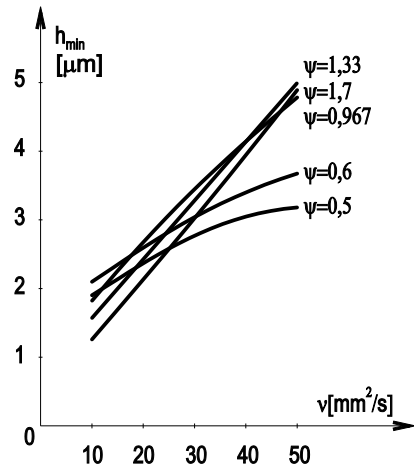
$a = 1,7 \cdot 10^{-7}$; $b = 720$; $c = 71$; $d = 0,2 \cdot 10^{-5}$; $e = 54$ - konstante

a gdje je kao osnova za korelaciju (6) poslužila literatura [1].

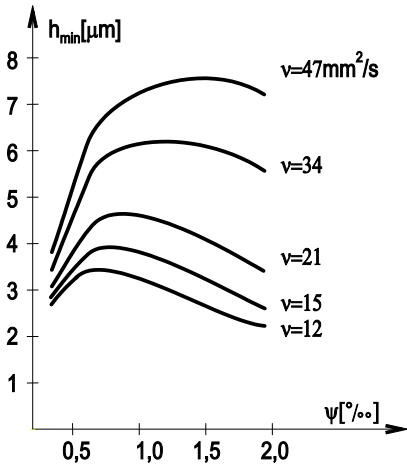
Analiziran je utjecaj viskoznosti ulja (ν) na ulazu u ležaj kao neovisno promjenjive veličine, koja se može regulirati u motoru uvođenjem hlađenja ulja, na funkcionalne veličine kliznih ležajeva. Također je variran relativni zazor ležaja (ψ) i analiziran njegov utjecaj na minimalnu debljinu uljnog filma (h_{min}). Rezultati proračuna vrijednosti minimalne debljine uljnog filma u funkciji viskoznosti ulja na ulazu u ležaj i relativnog zazora su prikazani na slici 6 i slici 7 za ležaj letećeg rukavca, a na slici 8 i slici 9 za ležaj glavnog rukavca.



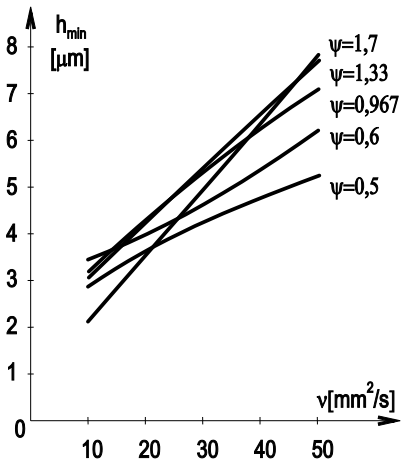
Slika 6: Promjena veličine h_{min} u funkciji zazora (ψ) za različite vrijednosti parametra viskoznosti (ν) za leteći ležaj motora ($n=2200$ o/min – maks. snaga)



Slika 7: Promjena veličine h_{min} u funkciji viskoznosti (ν) za različite vrijednosti parametra zazora (ψ) za leteći ležaj motora ($n=2200$ o/min – maks. snaga)



Slika 8: Promjena veličine h_{\min} u funkciji zazora (ψ) za različite vrijednosti parametra viskoznosti (ν) za glavni ležaj motora ($n=2200$ o/min – maks. snaga)



Slika 9: Promjena veličine (h_{\min}) u funkciji viskoznosti (ν) za različite vrijednosti parametra zazora (ψ) za glavni ležaj motora ($n=2200$ o/min – maks. snaga)

Primjetne su razlike vrijednosti (h_{\min}) kod letećeg i glavnog rukavca koje su najviše posljedica opterećenja, a karakter krivih ima sličan tok. Položaj maksimalnih vrijednosti (h_{\min}) se mijenja sa promjenom zazora (ψ) i viskoznosti (ν).

Kod svih prethodno prikazanih rezultata vidljiv je pad vrijednosti minimalne debljine uljnog filma (h_{\min}) sa smanjenjem viskoznosti, odnosno sa povećanjem temperature ulja u ležaju. Na viskoznost ulja u ležaju, pored karakteristika toka ulja ispred ležaja (protok, temperatura, ...), utječe brzinski režim i režim opterećenja motora kao i fizikalne osobine ulja.

Imajući u vidu temperaturu ulja na ulazu u ležaj, viskoznost ulja na ulazu se kreće u granicama $\nu = 16-25 \text{ mm}^2/\text{s}$. Viskoznost ulja u ležaju zavisi o zazoru rukavac-ležaj i opterećenju sklopa rukavac-ležaj (primjer za leteći ležaj slika 5). Ovaj parametar ima direktni utjecaj na minimalni noseći sloj ulja (h_{\min}) u ležaju, udio mješovitog trenja, što direktno utječe na povećanje temperature ulja u ležaju, smanjenje viskoznosti i povećanje mehaničkih gubitaka. Ovo upućuje na konstataciju da je viskoznost ulja za podmazivanje u motoru vrlo važan parametar i sa stajališta definiranja radnih uvjeta i sa stajališta reguliranja mehaničkih gubitaka u motoru.

4. Zaključak

U radu je prikazan model za proračun funkcionalnih veličina sklopa ležaj-rukavac na osnovi zadatih radnih uvjeta ležajnog sklopa. Model je verificiran s eksperimentalnim rezultatima čime se potvrđuje njegova praktična uporaba za analizu funkcionalnih veličina sklopa klizni ležaj-rukavac.

Rezultati prikazani u radu, koji govore o utjecaju viskoznosti ulja na funkcionalne veličine, pokazuju svu kompleksnost ovog problema. Smanjenje viskoznosti ulja u ležaju utječe direktno na smanjenje minimalno potrebne debljine uljnog filma (h_{\min}) i smanjenje otpora kretanja rukavca u ležaju, ali samo do jedne granice. Poslije toga dolazi do povećanja udjela mješovitog trenja, zbog pada h_{\min} , prisutnosti neravnina na ležajnom sklopu i deformacija sklopa, što također vodi ka značajnom povećanju mehaničkih gubitaka. Zbog toga je važno izvršiti izbor ulja za podmazivanje, čija karakteristika viskoznosti ima što manje promjene u području radne temperature u motoru, uz odgovarajuće vrijednosti viskoznosti.

Literatura

1. Lang, Steinhilper W.: Gleitlager, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1978.
2. Filipović I. Doleček V.: Optimal journal bearing operating conditions defined by using computer, 4th Symp. DENSING '96, Opatija, 1996.
3. Lasić D.: Razvoj matematskog modela i programa za proračun orbitalnih dijagrama rukavca nestacionarno opterećenih ležajeva, magistarski rad, Mašinski fakultet, Sarajevo, 1986.
4. Römer E.: Öldurchsatz, Öltemperatur und Lagerspiel von Gleitlager mit Druckschmierung, VDI-Zeitschrift Bd. 103 (1961) H17, H18.
5. Černež A., Filipović I., Lasić D., Dobovišek Ž., Gebert K.: Influence of design parameters on bearing operational performances of turbocharged diesel engine, ICE D'90, Dubrovnik, 1990.

UDK	ključne riječi	key words
621.822.573	hidrodinamički klizni ležaj	hydrodynamic plain bearing
.004.14	gledište funkcionalnih svojstava i konstrukcije	functional performance and design viewpoint
519.283.001.57	iterativni matematički model	iterative mathematical model
621.436.75	predpunjeni dizelov motor	supercharged diesel engine
621.4.016.4	radna temperatura i opterećenje motora	engine operating temperature and load
532.135	reološka svojstva motornog ulja	engine oil rheologic properties
621.891.275	čvrstoća mazivog sloja	lubricating film strength

Autori

Prof. dr. sc. Ivan Filipović; doc. dr. sc. Dževad Bibić,
Mašinski fakultet Sarajevo, Odsjek za motore i vozila, Vilsonovo šetalište 9
71 000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, tel./fax. +387 33 650 841
e-adresa: fillipovic@mef.unsa.ba, bibic@mef.unsa.ba

Primljeno

14.9.2009.

Prihvaćeno

10.6.2010.