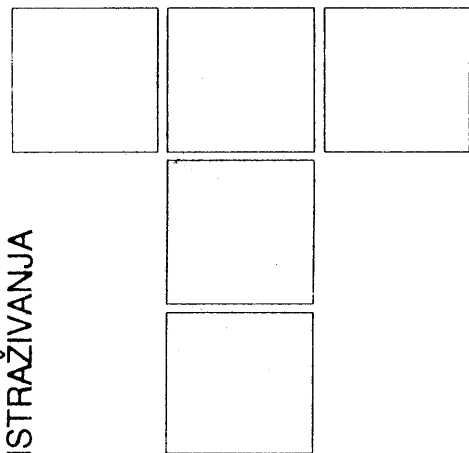


R. MITROVIĆ

Istraživanje uticaja radijalnog zazora na graničnu učestalost obrtnja kotrljajnih ležaja koji se podmazuju plastičnim mazivom

ISTRAŽIVANJA



1. UVOD

Potreba za različitim tipovima kotrljajnih ležaja sa razvojem mašinske tehnike dolazi sve više do izražaja, tim pre što se poslednjih nekoliko decenija unutrašnja konstrukcija ležaja nije značajnije menjala, a zahtevi za ležajima koji se obrću velikim učestanostima obrtnja sve su veći. To povećanje se ne odnosi samo na specijalne ležaje za mehaničke prenosnike u avioindustriji i proizvodnji alatnih mašina, nego i na obične - standardne.

Poznato je da i u slučaju veoma povoljnih radnih uslova nije moguće neograničeno povećavati učestanost obrtnja kotrljajnih ležaja. Povećanjem učestanosti obrtnja, povećavaju se i centrifugalne sile koje dodatno opterećuju delove kotrljajnih ležaja, otpori trenja, netačnost kretanja - vibracije i dr. Energija koja se u ležaju troši na savlađivanje otpora trenja između kotrljajnih tela i staza kotrljanja, kotrljajnog tela i kaveza i hidrodinamičkih otpora maziva, pretvara se u toplotu koja prouzrokuje zagrevanje ležaja i uležištenja. Količina toplote proizvedena u ležaju proporcionalna je energiji koja se troši na savlađivanje otpora trenja.

Uloga maziva kod ležaja sastoji se kako u smanjenju gubitaka energije usled trenja, tako i u odvođenju proizvedene toplote sa spregnutih površina. Za podmazivanje kotrljajnih ležaja najviše se koriste tečna i plastična maziva. Uticaj plastičnih maziva na radnu sposobnost kotrljajnih ležaja pri velikim učestanostima obrtnja

nedovoljno je istražen. Posebno je važno da se utvrde uticaji veličine opterećenja, količine i vrste maziva, radijalnog zazora i temperaturske stabilizacije na radnu sposobnost ležaja pri velikim učestanostima obrtnja. Kvantitativno vrednovanje uticaja pojedinih konstruktivnih i triboloških parametara na radnu sposobnost kotrljajnog ležaja pri velikim učestanostima obrtnja pre svega je važno za optimalno iskorišćenje osobina ležaja u obrtnim sklopovima mašina i uređaja i u istraživačkom radu na razvoju unutrašnje konstrukcije ležaja u cilju postizanja boljih eksploatacionih karakteristika.

2. GRANIČNA UČESTANOST OBRTNJA KOTRLJAJNIH LEŽAJA

Vodeći svetski proizvođači ležaja ne daju informacije o tome kako određuju karakteristike brzohodosti. U svojim katalogima daju orijentacione vrednosti maksimalne dozvoljene učestanosti obrtnja, dopunjene preporukama o radnim uslovima pri kojim ležaji mogu pouzdano da rade. Terminologija koja se koristi u ovoj oblasti u različitim izvorima je vrlo neujednačena. Koriste se na primer termin dozvoljena učestanost obrtnja, maksimalna dozvoljena učestanost obrtnja, granična učestanost obrtnja. Ovi termini ili uopšte nisu definisani ili su prezentirani dosta neprecizno pa njihovo značenje u velikoj meri zavisi od intuitivnog shvatanja. Opštevažeće za sve proizvođače je da se najveća učestanost obrtnja može dostići samo pri malim opterećenjima i dobrom podmazivanju odnosno hlađenju.

Dr Radivoje Mitrović, docent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

U cilju preciznijeg definisanja graničnih stanja brzohodnosti kotrljajnih ležaja koji se podmazuju uljem, prof. Bohaček sa VUT - Brno [1] predložio je sledeće definicije:

Kritična učestanost obrtanja (n_H, n_b) kotrljajnog ležaja je ona učestanost obrtanja pri kojoj se sa određenom verovatnoćom javlja neki od slučajeva graničnog stanja odnosno otkaza ležaja

Granična učestanost obrtanja (n_M, n_m) kotrljajnog ležaja je najveća učestanost obrtanja, pri kojoj ležaj pouzdano radi sa nominalnim opterećenjem i podmazivanjem u upravljanoj toplotnoj polju i ustaljenom radnom stanju sa 90%-tnom verovatnoćom rada bez otkaza

Osnovna učestanost obrtanja (n_Z, n_z) kotrljajnog ležaja je najveća učestanost obrtanja, pri kojoj ležaj radi sa propisanim opterećenjem i podmazivanjem u upravljanoj toplotnoj polju i ustaljenom radnom stanju sa 95%-tnom verovatnoćom rada bez otkaza i propisanim graničnim temperaturama, vibracijama, trenjem i habanjem

Nominalna učestanost obrtanja (n_K) kotrljajnog ležaja je najveća učestanost obrtanja data od strane proizvođača, pri kojoj ležaj sa odgovarajućim stepenom sigurnosti radi bez otkaza, pod radnim uslovima koje je utvrdio proizvođač

Dozvoljena učestanost obrtanja (n_D) kotrljajnog ležaja je najveća učestanost obrtanja pri kojoj ležaj pouzdano radi u određenom uležištenju, pri datom radnom opterećenju, podmazivanju i hlađenju i definisanom toplotnom polju u zahtevanom periodu vremena sa P% verovatnoćom i zahtevanim granicama temperature, vibracija i habanja

Relativna učestanost obrtanja (f) kotrljajnog ležaja je bezdimenzioni broj, koji predstavlja odnos date i nominalne učestanosti obrtanja:

$$f_M = \frac{n_M}{n_K}; \quad f_Z = \frac{n_Z}{n_K}; \quad f_i = \frac{n_i}{n_K}; \quad \dots$$

Indeksi u oznakama za pojedine učestanosti obrtanja se odnose: velika slova na grupu ležaja, a mala na jedan ležaj.

Određivanje granične učestanosti obrtanja kotrljajnih ležaja koji se podmazuju uljem, vrši se na uređaju sa cirkulacionim podmazivanjem, pri čemu mazivo ima ulogu i rashladnog medijuma. Kada je reč o određivanju granične učestanosti obrtanja kotrljajnih ležaja koji se podmazuju plastičnim mazivom, ne može se koristiti isti način podmazivanja odnosno hlađenja uređaja, prvenstveno zbog toga što nije moguće ostvariti apsolutno zaptivanje ležaja i prodiranje ulja u slobodnu zapreminu ležaja koja se podmazuje plastičnim mazivom. Prodiranje ulja za hlađenje u ležaj napunjen plastičnim mazivom poremetilo bi regularnost ispitivanja. Zbog toga se odvo-

đenje toplote sa uređaja za ispitivanje u ovom slučaju vrši prirodnom konvekcijom.

Granična učestanost obrtanja kotrljajnih ležaja zavisi od veličine i raspodele opterećenja na kotrljajna tela, energetskih gubitaka u ležaju, uslova podmazivanja, vrste i količine maziva i drugih faktora. Raspodela opterećenja na kotrljajna tela pri tome zavisi od veličine radijalnog zazora (koji je funkcija unutrašnje geometrije ležaja) i centrifugalnih sila na kotrljajnim telima čija veličina zavisi od učestanosti obrtanja. Uticaj nekih od ovih faktora može se ustanoviti teorijskom analizom, a za određene je potrebno izvršiti i eksperimentalna ispitivanja. Detaljna analiza uticaja ovih faktora na graničnu učestanost ležaja prikazana je u [4].

3. UNUTRAŠNJI RADIJALNI ZAZOR

Radijalni zazor kotrljajnog ležaja predstavlja "srednju vrednost ukupnih pomeranja koja su upravna na osu povrta ležaja, pri čemu je jedan prsten pomerljiv, a drugi miruje" (JUS M.C3.754). Pri tome se pretpostavlja da su prečnici staza kotrljanja prstenova i kotrljajna tela, njihov oblik i položaj idealno tačni. Teorijski, radijalni zazor ležaja e može se izračunati iz izraza:

$$e = D_1 - D_2 - 2 \cdot D_K$$

gde je D_1 - prečnik staze kotrljanja spoljašnjeg prstena
 D_2 - prečnik staze kotrljanja unutrašnjeg prstena
 D_K - prečnik kuglice (slika 1).

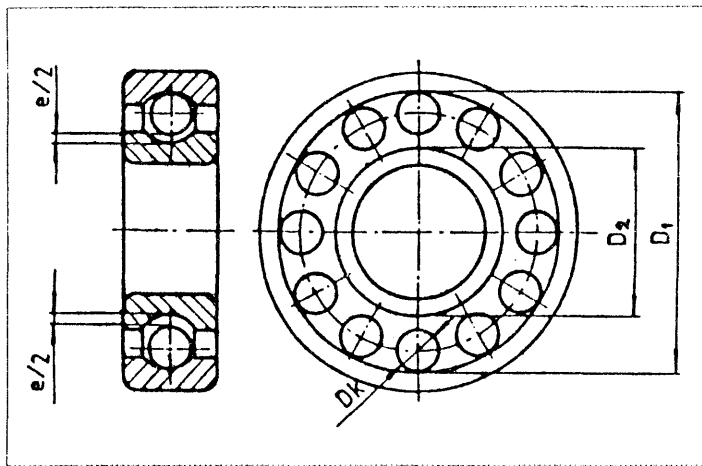
Prema ISO 5593 unutrašnji radijalni zazor ležaja definiše se kao "srednja aritmetička vrednost radijalnog rastojanja za koje se jedan prsten ili kolut može pomeriti u odnosu na drugi iz jednog krajnjeg položaja u suprotni krajnji položaj, pri različitim ugaonim položajima, bez delovanja spoljašnjeg opterećenja. Srednja vrednost uključuje u sebe i pomeranje prstenova ili kolutova u različitim ugaonim položajima, međusobno i sa garniturom kotrljajnih tela".

U zavisnosti od stanja ležaja razlikuju se tri vida unutrašnjeg radijalnog zazora: fabrikacioni, montažni i radni.

Propisivanje fabrikacionog radijalnog zazora ležaja, od koga u velikoj meri zavisi veličina radnog zazora ležaja, ima za cilj da obezbedi odgovarajuće:

- raspodelu opterećenja na kotrljajna tela ležaja;
- tačnost obrtanja (krutost) ležaja;
- nivo vibracija ležaja u toku rada;
- nivo buke ležaja u toku rada;
- gubitke trenja u ležaju i
- temperaturu ležaja.

Ako je radni radijalni zazor u ležaju mali (blizak nuli) otpori kretanju kotrljajnih tela po stazama kotrljanja biće "veliki", a time i radna temperatura ležaja. Sa aspekta pouzdanosti povoljniji je veći radijalni zazor, a sa aspekta raspodele opterećenja na kotrljajna tela radijalni zazor treba da je što manji.



Sl. 1 - Radijalni zazor kugličnog jednorednog ležaja
Radial clearance of single-line ball bearing
Радиальный зазор однорядного шарикоподшипника

Radni radijalni zazor se može odrediti iz izraza:

$$e_r = e_f \Delta e_u - \Delta e_q - \Delta e_\delta - \Delta e_c$$

gde je: e_r - radijalni zazor ležaja;

e_f - fabrikacioni zazor;

Δe_u - promena zazora u ugradnji ležaja usled preklopa između unutrašnjeg prstena i vratila, odnosno spoljašnjeg prstena i kućišta;

Δe_q - promena zazora usled temperaturnih dilatacija;

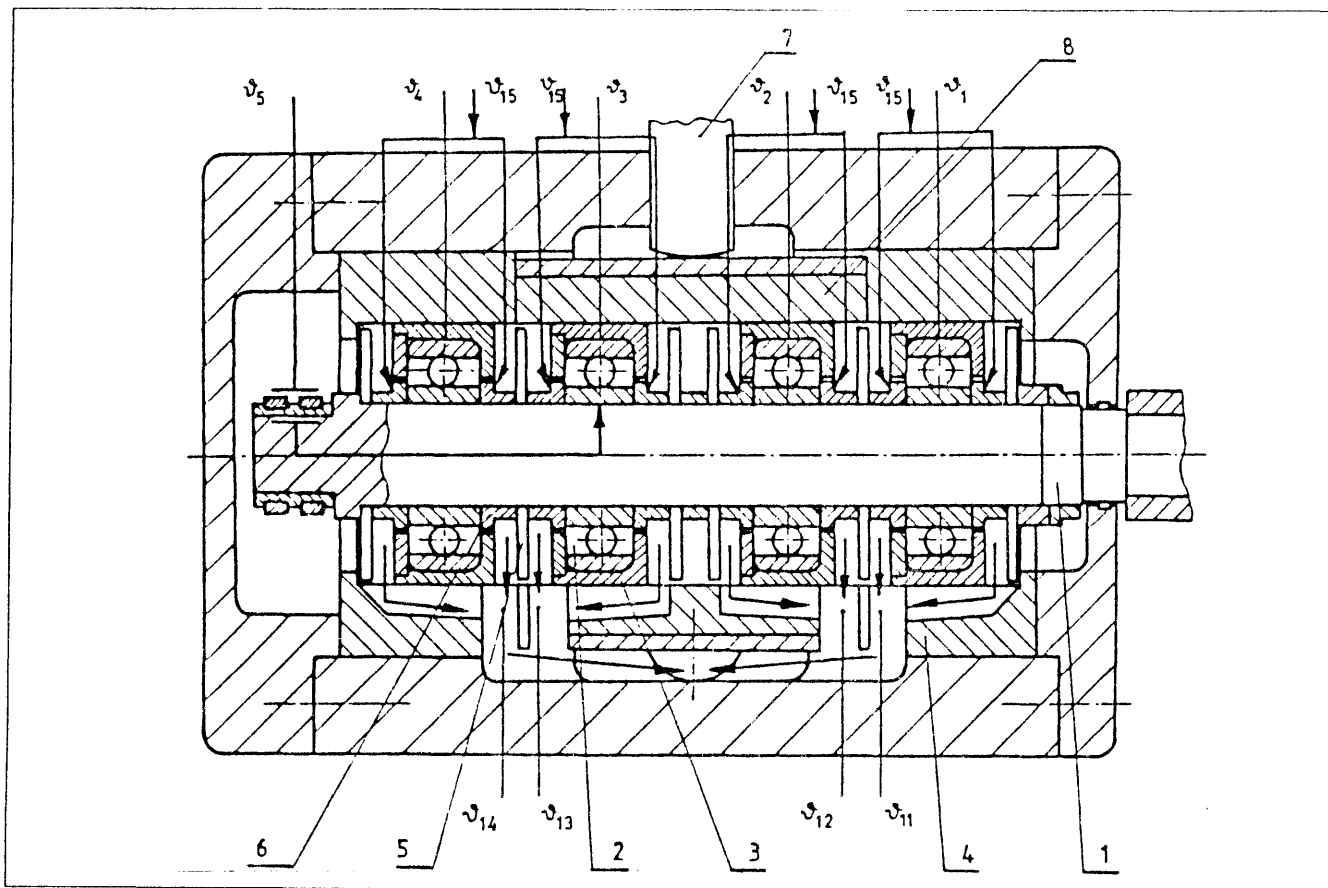
Δe_δ - promena zazora usled deformacija pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja;

Δe_c - promena zazora usled dejstva centrifugalnih sila.

4. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE UTICAJA RADIJALNOG ZAZORA NA GRANIČNU UČESTANOST OBRRTANJA

Sva eksperimentalna ispitivanja uticaja radijalnog zazora na graničnu učestanost obrtanja kotrljajnih ležaja obavljena su na VUT - Fakulteta strojni u Brnu na uređaju za određivanje granične učestanosti obrtanja kotrljajnih ležaja MFO-01. Uređaj omogućava ispitivanje četiri ležaja istovremeno. Konstrukcija sklopa vratila i kućišta prikazana je na slici 2. Ležaji 2 montiraju se na vratilo 1 sa malim preklopom.

Dva srednja ležaja se nalaze u čauri 8, na koju se preko klipa 7 dovodi spoljašnje opterećenje $2F_r$. Ležaji su međusobno izolovani tekstolitimnim čaurama 4 i prstenovima 5. Spoljašnji prstenovi ležaja su ugrađeni u izolacione čaure 3, a unutrašnji prstenovi naležu na izolacione čaure 6. Toplotna izolacija ispitivanih ležaja omogućava precizno praćenje temperaturnih promena u svakom od ispitivanih ležaja. Merenje temperature na unutrašnjem prstenu ψ_5 omogućava praćenje temperaturnih prome-



Sl. 2. Konstrukcija glave uređaja za ispitivanje kotrljajnih ležaja
Design of the head of rolling bearing testing device
Конструкция головки установки для испытаний подшипников качения

na koje su izražene u prelaznim režimima rada. Merenje temperature unutrašnjeg prstena vrši se samo na jednom ležaju. Na svakom od ispitivanih ležaja meri se temperatura spoljašnjeg prstena. Osim toga, moguće je meriti i vibracije na svakom od ispitivanih ležaja.

Ispitivanja su vršena pri čisto radijalnom opterećenju konstantnog pravca i intenziteta. Opterećenje se izračunava iz izraza za radni vek ležaja i za računski radni vek ležaja od 10 000 časova ono iznosi:

$$F_r = \frac{C}{(0.6 \cdot n_k)^{1/\alpha}}$$

gde je: C - dinamička nosivost ispitivanog ležaja;
 n_k - nominalna učestanost obrtanja;
 α - eksponent u jednačini radnog veka ležaja
($\alpha=3$ za kuglične i $\alpha=10/3$ za valjkaste ležaje).

Tokom ispitivanja opterećenje se ne menja. Učestanost obrtanja se menja i to tako što ispitivanje započinje sa učestanošću obrtanja koja približno odgovara $0.25n_k$ i traje do uspostavljanja toplotne ravnoteže uležištenja i okoline. Zatim se učestanost obrtanja povećava tako da temperaturni skok ne bude suviše veliki. Ispitivanje se završava u trenutku kada radna temperatura ležaja prekorači graničnu vrednost. Tokom ispitivanja kontrolišu se temperature na svakom od ispitivanih ležaja, učestanost obrtanja i opterećenje i vrši korekcija pošto sa vremenom dolazi do pada pritiska u hidrauličkom agregatu za opterećenje.

S obzirom da su ova ispitivanja kratkotrajna jer je osnovna intencija da se geometrija ležaja tokom ispitivanja bitnije ne promeni kako bi se na istim ležajima izvršilo više ispitivanja i rezultati ispitivanja mogli uporediti, to je kao kriterijum graničnog stanja ležaja korišćena granična temperatura ležaja. Ovome u prilog ide činjenica da su svi merodavni faktori koji limitiraju rad ležaja (veličina opterećenja, radijalni zazor odnosno raspodela opterećenja na kotrljajna tela, učestanost obrtanja, vrsta i količina maziva) direktno manifestuju promenom radne temperature ležaja.

Za podmazivanje ležaja korišćeno je plastično mazivo koje proizvođači kotrljanih ležaja koriste u redovnoj proizvodnji.

5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Raspodela spoljašnjeg radijalnog opterećenja na kotrljajna tela ležaja je neravnomerna. Ukupno spoljašnje opterećenje sa jednog prstena na drugi prenosi se preko nekoliko od ukupno (z) kuglica, što zavisi od veličine radijalnog zazora, intenziteta opterećenja, unutrašnje geometrije ležaja i drugih faktora.

Uticao radijalnog zazora na raspodelu opterećenja na kotrljajna tela ležaja manifestuje se tako što se sa po-

većanjem zazora smanjuje veličina opterećene zone, a intenzitet opterećenja koje prenosi najopterećenija kuglica povećava. Zbog toga je i ukupna kontaktna deformacija spregnutih delova na mestu najopterećenije kuglice veća. Tačnost obrtanja i gubici usled trenja su manji [3].

U literaturi [2] je pokazano da se sa povećanjem radijalnog zazora u ležaju nosivost smanjuje. Uticaj veličine radijalnog zazora na temperaturu ležaja pri povećanju učestanosti obrtanja detaljno je izložen u [3]. Pri eksperimentalnim ispitivanjima korišćeni su kuglični kotrljajni ležaji 6204 sa minimalnim i maksimalnim vrednostima zazora domaće proizvodnje - IKL. Podaci o ležajima dati su u tabeli 1. Za ovaj ležaj u Tehničkom katalogu PZL iz 1986. godine propisane su sledeće vrednosti zazora - tabela 2.

Tabela 1.

Ležaj br.	9	10	11	12	13	14	15	16
e / μm	8	8	9	9	27	26	27	29

Tabela 2.

	Unutrašnji radijalni zazor ležaja 6204				
	C2	normalni	C3	C4	C5
mm	μm	μm	μm	μm	μm
18-24	0-10	2-20	13-28	20-36	28-48

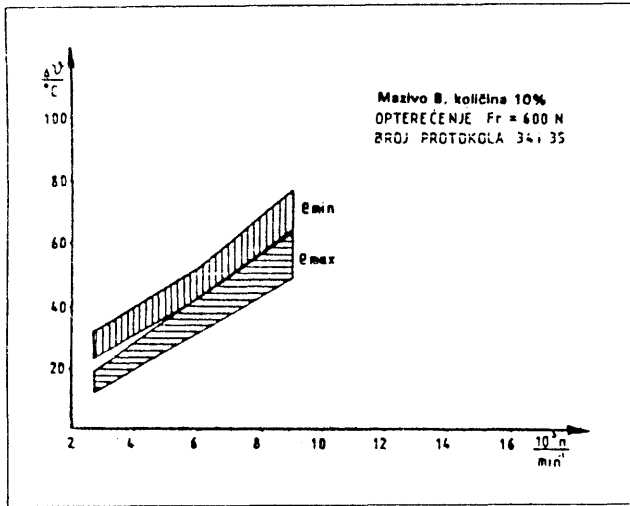
Ispitivanja su izvršena na ležajima sa minimalnim i maksimalnim vrednostima radijalnog zazora i različitim količinama plastičnog maziva. Radijalno opterećenje je isto za sva ispitivanja i iznosi 600N pri različitim učestanostima obrtanja.

Na slici 3 su prikazani uporedni rezultati merenja radne temperature ležaja u funkciji od učestanosti obrtanja i minimalne, odnosno, maksimalne vrednosti radijalnog zazora za količinu maziva u ležaju od 10% slobodne zapremine, a na slikama 4 i 5 prikazani su rezultati merenja za iste ležaje napunjene sa 20%, odnosno 30% slobodne zapremine ležaja.

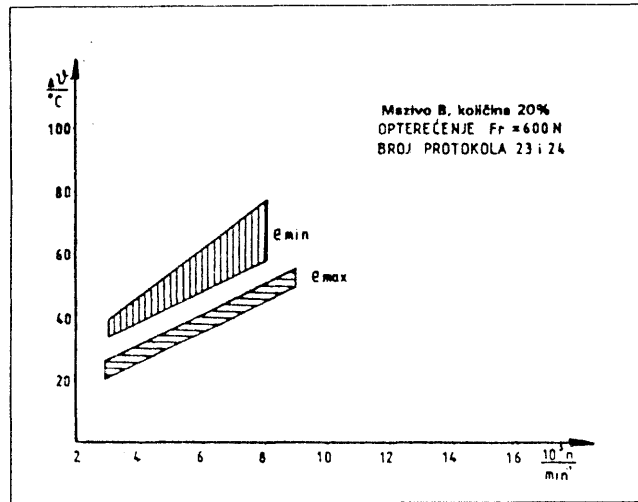
Na slici 6 su prikazani uporedni rezultati ispitivanja za ležaje sa minimalnim i maksimalnim vrednostima radijalnog zazora u funkciji od količine maziva u ležaju i učestanosti obrtanja u trodimenzionalnom pravougaonom koordinatnom sistemu.

Na osnovu dobijenih rezultata može se konstatovati sledeće:

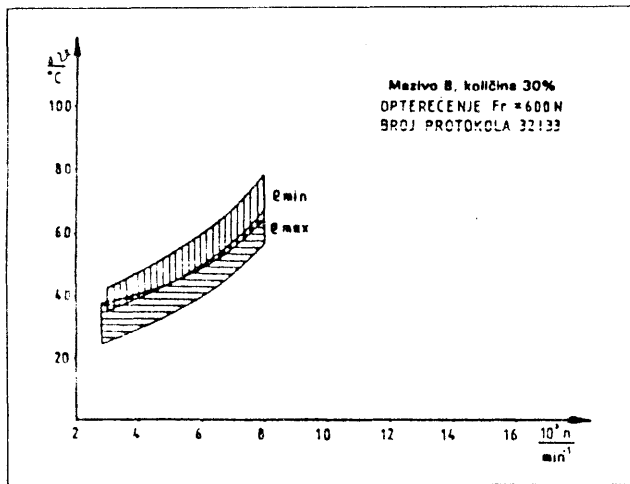
Radne temperature kotrljajnih ležaja sa minimalnim vrednostima radijalnog zazora su veće od temperatura ležaja sa maksimalnim vrednostima zazora. S obzirom da



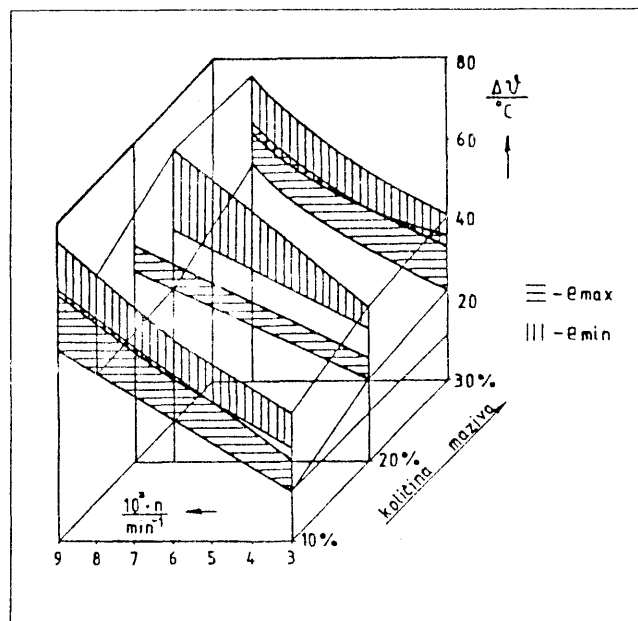
Sl. 3.
Fig. 3.
Ris. 3.



Sl. 4.
Fig. 4.
Ris. 4.



Sl. 5.
Fig. 5.
Ris. 5.



Sl. 6.
Fig. 6.
Ris. 3.

se sa povećanjem unutrašnjeg radijalnog zazora u ležaju, gubici energije potrebne za savlađivanje otpora trenja u ležaju se smanjuju, to je logično da će se toplotna ravnoteža pri istim uslovima odvođenja toplote, kod ležaja sa većim zazorom uspostavljati na nižoj temperaturi. Uspostavljanje toplotne ravnoteže za ležaje napunjene većom količinom maziva, odvija se na većoj temperaturi, pošto su tada i hidrodinamički otpori maziva veći, pa se za savlađivanje ovih otpora troši veća količina energije, koja se pretvara u toplotu.

6. ZAKLJUČAK

- ▶ Granična učestanost obrtanja ležaja predstavlja važnu karakteristiku za pravilan izbor ležaja. Ona zavisi od niza faktora: veličine opterećenja, vrste i količine maziva, unutrašnje geometrije, radijalnog zazora, klase tačnosti izrade delova ležaja i deformacije uležištenja.
- ▶ Sa smanjenjem unutrašnjeg radijalnog zazora povećava se radna temperatura ležaja, odnosno smanjuje granična učestanost obrtanja.
- ▶ Sa povećanjem količine maziva u ležaju povećavaju se hidrodinamički otpori maziva, kao i radna temperatura ležaja.
- ▶ O ovim činjenicama posebno treba voditi računa prilikom propisivanja, odnosno izbora veličine fabrikacionog radijalnog zazora ležaja.

LITERATURA

- [1.] BOHAČEK F.: Analiza a hodnoceny rychobeznosti valivih ložisek, Doctorska disertačni prace, Brno, 1979.
- [2.] КОВАЛЕВ М. П., НАРАДЕЦКИЙ М. З.: Расчет высокоточных шарикоподшипников, Москва 1980.
- [3.] MITROVIĆ R. Analiza uticaja elastičnih deforma-cijai unutrašnjeg radijalnog zazora kotrljajnog kugličnog ležaja na raspodelu opterećenja na kotrljajna tela i nosivost, Magistarska teza, Beograd, 1987.
- [4.] MITROVIĆ R.: Istraživanje uticaja konstruktivnih i triboloških parametara kotrljajnog kugličnog ležaja na radnu sposobnost pri velikim učestanostima obrtanja, Doktorska disertacija, Beograd, 1992.

Investigation of Influence of Radial Clearance on the Critical Speed of Rolling Bearings Lubricated With Grease

Critical speed of rolling bearings depends on many factors: loading, type and quantity of lubricant, internal geometri, radial clearance, quality grade of bearing parts fabrication, bearing deformation, etc.

The work presents result of experimental invenstigations carred out in order to determine the influence of radial clearance on the critical speed of ball bearings lubricated with various quantities of grease.

Исследование воздействия радиального зазора на предельную частоту вращения подшипников качения, смазываемых пластичной смазкой

Предельная частотойности вращения подшипников качения зависи от ряда факторов: степени нагрузки, вида и количества смазки, внутренней геометрии, радиального зазора, класса точности изготовления частей подшипника, деформации оиоры и др.

В настоящей работе показаны результаты экспериментальных исследований влияния радиального зазора на предельную частотойности вращения шариковых подшипников качения, которые смазываются различными количествами пластичной смазки.