

Borojev, Lj.*

PRIOLOG ISTRAŽIVANJU PROBLEMATIKE HIDROSTATIČKOG
ULEŽIŠTENJA

THE CONTRIBUTION TO RESEARCH INTO HYDROSTATIC
BEARINGS

Summary

The paper presents one part of the researches considering the hydrostatic bearing system for machine tools spindles. Performed investigations refer mainly to experimental model design and its testing.

After a short dealing with some hydrostatic bearings parameters, the problems related to the manufacture are pointed out. Further, the calculation procedure of radial hydrostatic bearings for a grinding machine spindle is discussed. The fundamental data about construction and manufacture of some parts of experimental model are given. Main characteristics of spindle drive and whole hydraulic instalation are cited too.

The performances investigation is described in detail, and some of obtained results are presented. The comparison of experimental and calculated results is done with analysis of their deviation.

Finally, the brief consideration about performed research phase is given and the possibility of precisely determination of hydrostatic bearing performances, using such a way, is pointed out.

*) Mr Ljubomir Borojev, dipl.ing., asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, V. Perića-Valtera 2, Novi Sad

Rad je saopšten na 22. Savetovanju proizvodnog mašinstva Jugoslavije u Ohridu, 1989. godine.

Rezime

U radu je prikazan jedan segment istraživanja problematike hidrostatičkog uležištenja glavnih vretena mašina alatki, koji se odnosi na realizaciju eksperimentalnog modela i izvedena ispitivanja. Polazi se od analize nekih parametara proračuna radijalnih ležišta, prema čemu je projektovan eksperimentalni model. Nakon prikaza realizovanog modela, navodi se izvedeno ispitivanje i daje prikaz nekih rezultata, sa kratkim završnim osvrtom na izvedenu fazu istraživanja.

1. UVOD

Na radnu tačnost mašina alatki za obradu skidanjem strugotine dominantan uticaj ima sistem glavnog vretena sa svojim uležištenjem. Eksploatacioni uslovi koje savremena proizvodnja nameće mašinama alatkama diktiraju i zahteve sklopu glavnog vretena u vidu tačnosti pozicije, krutosti, nosivosti, dinamičke stabilnosti i dr.

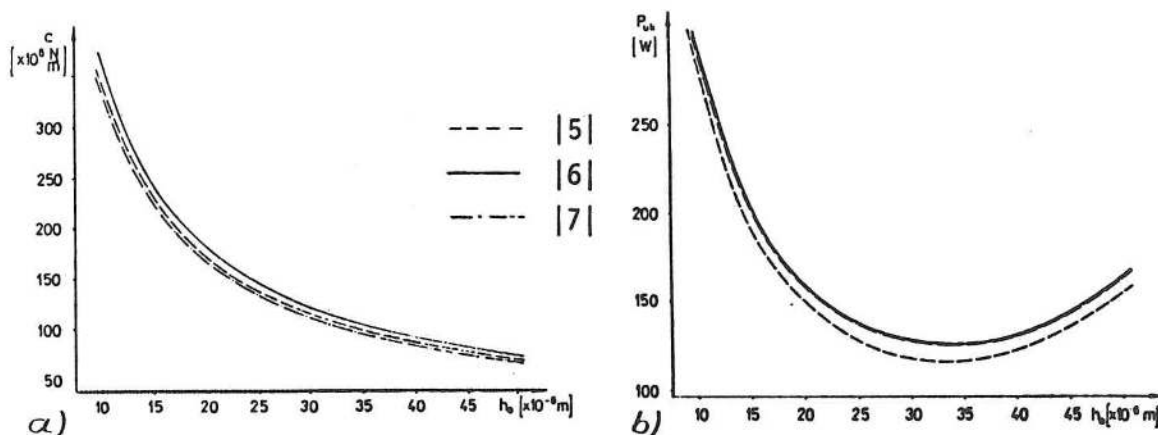
Ovi zahtevi trebaju biti ostvareni uz maksimalnu sigurnost u radu i dug vek, sa održanjem visokog nivoa karakteristika ponašanja. Jednu vrstu ležišta, koja u velikoj meri zadovoljavaju ovim zahtevima predstavljaju hidrostatička, i ona su tokom dužeg perioda predmet istraživanja na Institutu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. U ovom radu je izložen jedan segment tih istraživanja vezan za projektovanje eksperimentalnog modela hidrostatički uležištenog vretena brusilice, njegovu izradu i ispitivanje.

2. PARAMETRI KONSTRUKCIJE

Polazeći od detaljnog razmatranja proračuna radijalnih hidrostatičkih ležišta [5], [6], [7], izvršena je analiza uticaja pojedinih parametara na karakteristike ponašanja - performanse. Za slučaj posmatranja krutosti npr. (sl. 1.a) uočljiva je potreba primene malih radijalnih zazora, no ovo može dovesti do porasta ukupne potrebne snage (sl. 1.b) zbog povećanja gubitaka usled trenja, iako je protok, odnosno pumpna snaga, smanjena.

Slična je situacija i sa širinom kružnog praga, jedino se povećanje snage u oblasti malih širina sada javlja zbog povećanja protoka, iako uz smanjenje gubitka usled trenja.

Oba razmatrana parametra imaju i druga ograničenja. Tako je minimalni zazor limitiran mogućnošću izrade u vrlo uskom polju tolerancija, vrstom obrade i odgovarajućom cenom. Promena zazora u odnosu na projektovani nastaje kao posledica zadanih tolerancija prečnika rukavca i ležišta. Tolerancija zazora



Sl. 1. Zavisnost krutosti (a) i ukupne snage (b) od zazora

Fig. 1 The variation of stiffness (a) and total power (b) with clearance

može da se izrazi u funkciji veličine samog zazora [5], [6]:

$$\Delta h_0 = (0,1 \div 0,2) h_0$$

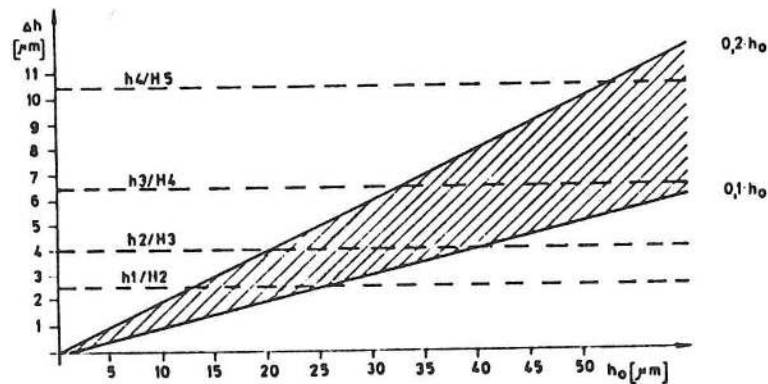
Ova zavisnost definiše šrafiranu oblast dijagrama na slici 2. Na njoj su prikazane i vrednosti najvećeg tolerancijskog polja zazora za slučaj da se prečnik rukavca $\phi 56$ mm izradjuje za jednu klasu tačnije od otvora ležišta, a obe mere u položaju tolerancijskog polja $h(H)$.

Zahtev za potrebnom tolerancijom izrade rukavca i ležišta ukazuje slikovito na proizvodne probleme, odnosno cenu izrade ovakvih elemenata.

Što se širine kružnog praga tiče, njegova minimalna veličina je ograničena dozvoljenim pritiskom za slučaj metalnog kontakta sa rukavcem tj. pri isključenom pogonu i napajanju ležišta. Ovo je uradjeno za jednu veličinu brusilica prema [4]. Za moguća opterećenja takve brusilice u eksploataciji određeni su i zahtevi pojedinih performansi radijalnih ležišta. To je izvedeno definisanjem opterećenja na vretenu i proračunom potrebne moći nošenja i krutosti ležišta, koja uz prisutnu elastičnost vretena obezbedjuje limitiran ukupan ugib tocila, i na taj način omogućuje odgovarajuću tačnost obradka.

Na takav način definisani su neki parametri konstrukcije ležišta i zahtevi pojedinih performansi. Pomoću razvijenog programskog paketa RADHIL [2] izveden je niz varijantnih proračuna prema čemu su definisani ostali parametri, kako geometrijski, tako i radni, respektujući postavljena ograničenja i težeći najmanjoj mogućoj ukupnoj snazi. Na osnovu tih podataka projektovana su i izradjena dva para radijalnih ležišta različitog zazora (i dubine džepova), izabrano nekoliko viskoziteta ulja i definisan opseg pritisaka napajanja.

Ispitivanje ponašanja tako projektovanog uležištenja odabranog vrete-

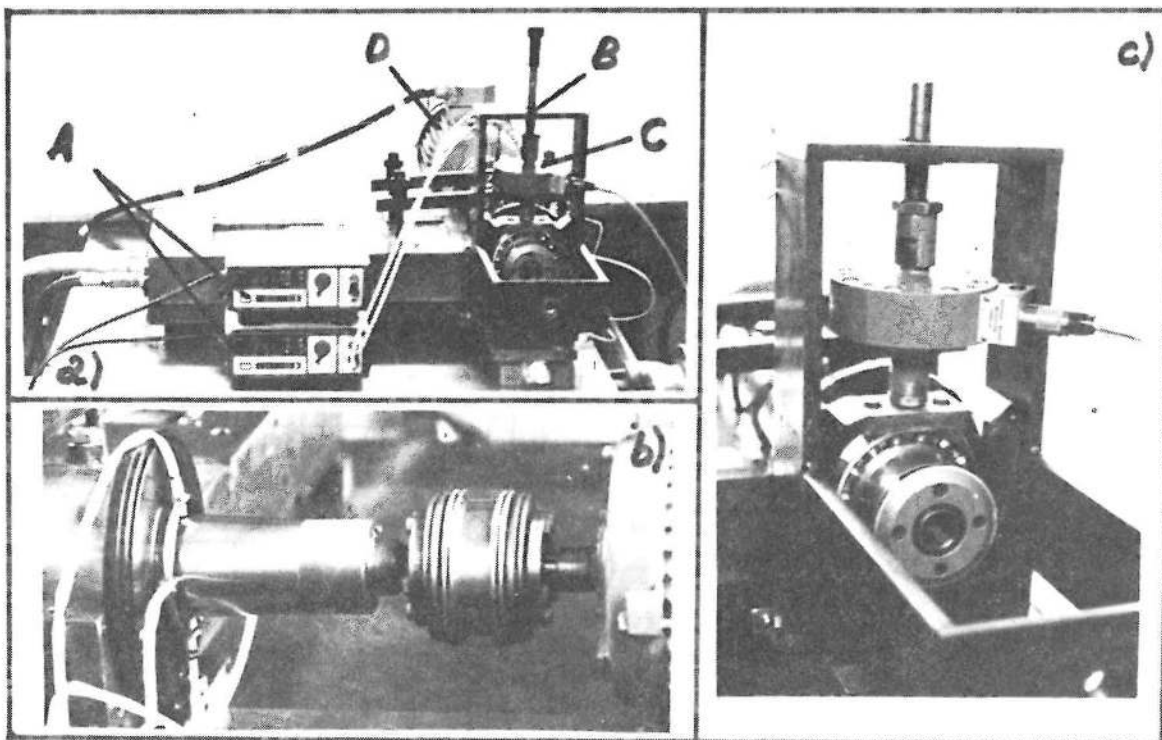


Sl. 2. Zavisnost tolerancije zazora od njegove dimenzije
 Fig. 2 The variation of clearance tolerance with its grade

na predvidjeno je merenjem pomeranja vretena pri različitim opterećenjima na mestu tocila. Imajući u vidu da je proračunskim modelom obuhvaćena hidrostatička krutost, a da se pri obrtanju javlja obavezno i hidrodinamički efekat, koji u manjoj ili većoj meri utiče na stvarnu krutost ležišta, predvidjeno je ispitivanje kako pri mirovanju, tako i obrtanju vretena. Uz merenje položaja vretena, predvidjeno je i praćenje protoka, te priraštaja temperature ulja, u cilju poredjenja sa proračunatim performansama i provere primenjenog sistema napajanja ležišta i vrste ulja.

3. EKSPERIMENTALNI MODEL HIDROSTATIČKI ULEŽIŠTENOG VRETENA

Vreteno jedne od brusilica proizvodnje LZT "K" iz Kikinde uležišteno je sa dva radijalna i jednim dvostrukim aksijalnim hidrostatičkim ležištem. Radijalna ležišta izvedena su sa kapilarnim prigušnicima oblika zavojnice, trouglastog poprečnog preseka. Dimenzija preseka određena je na osnovu projektovanog prigušenja pritiska uz uslov laminarnog strujanja, a izradjena je na brusilici za navoje. Četiri džepa svakog ležišta izradjena su na obradnom centru finim struganjem, uz ekscentričnost osa alata i ležišta. Projektovane dimenzije aksijalnih pragova i dubine džepova obezbedjene su podešavanjem radijusa alata i veličine ekscentriciteta. Respektujući preporuke pojedinih autora po pitanju dubine džepa, kao i uslov laminarnosti strujanja ulja u džepovima pri obrtanju, određena je i izvedena odgovarajuća dubina džepova. Ležišta sa vretenom postavljena su u čauru, kroz koju je obezbedjeno snabdevanje svakog ležišta uljem, kao i odvod ulja. Čaura je postavljena u vreteništa brusilice. Poklopac vreteništa nije tokom ispitivanja stavljan na postolje zbog lakšeg pristupa pojedinih davača. Obzirom na to, ukrućenje čaure sa ležištima i vretenom izvedeno je posebno, sa dva poprečna rama. Izgled vretena (sa instrumentima za merenje temperature (A), generisanje (B) i merenje sile (C), i pogonskim elektromotorom (D)) prikazan je na sl. 3a.



Sl. 3. Izgled eksperimentalnog modela

Fig. 3. The details of realized experimental model

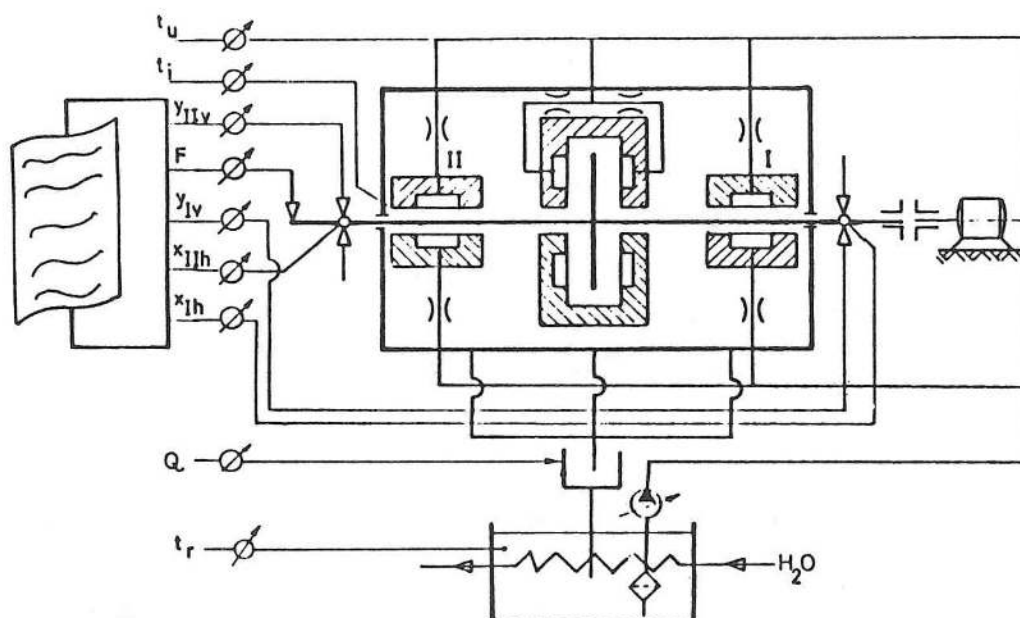
Napajanje ležišta uljem obezbedjeno je hidrauličnim agregatom sa pumpom promenljivog kapaciteta REXROTH 1PV2V3-42/25RA01MC63A1 i rezervoarom zapremine 50 l. Radi hlađenja ulja postavljena je u rezervoar spiralna bakarna cev kroz koju je obezbedjen stalni protok hladne vode tokom ispitivanja. Takodje je ugradjena okretna lopatica za mešanje ulja.

Pogon vretena izveden je dvobrzinskim elektromotorom ZK 90 L 4/2. Radi ispitivanja vretena pod dejstvom samo poznate generisane sile, elektromotor je priključen preko torzione spojnice JAKOB KSS 8AA (sl. 3b).

4. ISPITIVANJE HIDROSTATIČKI ULEŽIŠTENOG VRETENA

U okviru ispitivanja hidrostatički uležištenog vretena izvedeno je merenje njegovog položaja pri raznim opterećenjima, uz variranje pritiska napajanja ležišta i broja obrtaja vretena, merenje protoka i merenje temperature ulja ispred i iza jednog radijalnog ležišta radi odredjivanja priraštaja temperature. Šematski prikaz ispitivanog vretena, sa položajem i oznakama merenih veličina, dat je na slici 4.

Opterećivanje vretena vršeno je na mestu predvidjenom za postavljanje točila, pomoću zavrtnja pribora projektovanog za generisanje sile. Prenos opterećenja izveden je preko induktivnog dinamometra HOTTINGER Q3/1000-5 i radijalnog kugličnog ležaja postavljenog na vreteno. Ovaj detalj prikazan je



Sl. 4. Šema merenja uležištenog vretena
 Fig. 4 The measuring scheme of spindle and bearings

na sl. 3c.

Merenje pomeranja vretena izvedeno je na dva mesta sa spoljne strane radialnih ležišta van čaure vreteništa. Ono je izvršeno u vertikalnoj i horizontalnoj ravni sa po dva para induktivnih bezkontaktnih davača HOTTINGER TR2, pričvršćenih na poklopce čaure. Ovaj detalj vidi se na sl. 3b. Registrovanje veličine opterećenja i pomeranja izvedeno je na traci svetlosnog pisarča A.FISCHER AF 8 UV-G.

Protok ulja je registrovan u povratnom vodu, merenjem vremena punjena posebne posude odredjene zapremine.

Temperature ulja praćene su termoparovima i digitalnim termometrima TAKEDA RIKEN TR 2112. Temperatura je merena u dovodu jednog radialnog ležišta sa termoparom postavljenim u bakarnu cevčicu potpoljenu u uljnu struju napajanja. Drugi termopar ugradjen je na unutrašnju stranu poklopca čaure u neposrednu blizinu spoljne strane radialnog ležišta II. Osim toga, merena je i temperatura ulja u samom rezervoaru.

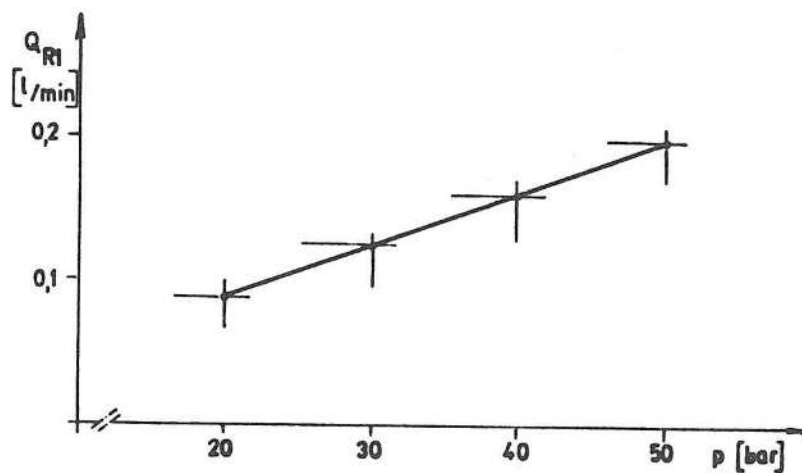
5. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanje hidrostatički uležištenog vretena izvedeno je za sada sa jednim parom radialnih ležišta zazora $40\ \mu\text{m}$ i jednim uljem viskoziteta $26,4\ \text{mPas}$ (na 40°C). Ispitivanja su vršena uz variranje pritiska napajanja u dijapazonu $(20 \div 50)$ bar, a pri mirovanju vretena i njegovim obrtanjem sa 1430 i 2820 o/min.

Merenje protoka ulja izvedeno je više puta za sva ležišta zajedno, zbog poteškoće razdvajanja pojedinačnih protoka kroz ležišta. Konstatovana je mala razlika u funkciji broja obrtaja, koja se može objasniti prisustvom različitog viskoziteta ulja zbog temperatura koje se javljaju pri pojedinim režimima rada.

Nakon toga su, pri mirovanju vretena, napajana samo pojedina ležišta i meren njihov protok. Mala razlika sume pojedinačnih protoka i merenog ukupnog, pokazala je na mogućnost ovakvog određivanja protoka ležišta.

Na slici 5 prikazan je protok radijalnog hidrostatičkog ležišta za razne pritiske napajanja uljem, i on je u potpunosti u skladu sa proračunskim vrednostima.



Sl. 5. Protok radijalnog hidrostatičkog ležišta

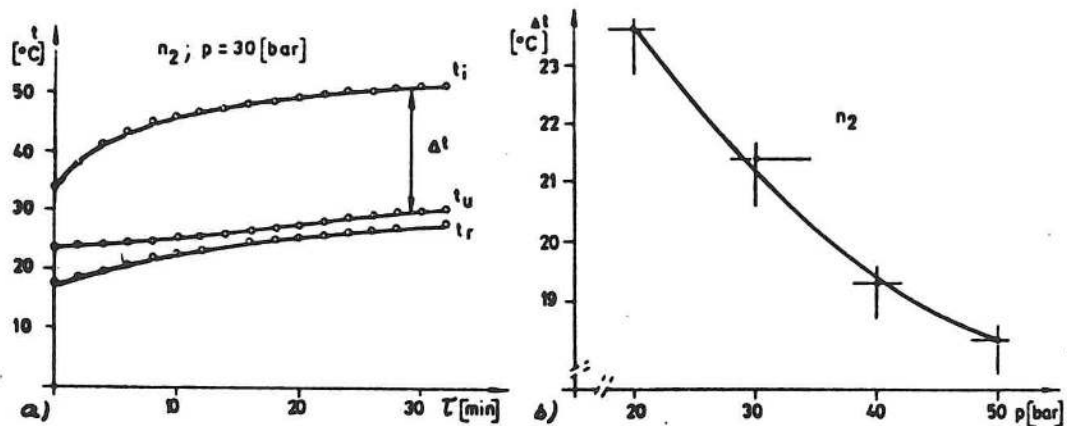
Fig 5 The variation of flow with supply pressure

Ispitivanje priraštaja temperature ulja pri strujanju kroz radijalno ležište izvedeno je merenjem temperature ispred i iza ležišta. Pokušaj merenja neposredno ispred ležišta pokazao se nepouzdanim zbog uticaja temperature relativno velike mase čaure ležišta i postolja koje zagreva izlazna struja ulja. Nakon odmicanja ove merne tačke, dobiveni su rezultati čiji je delimičan prikaz dat na slici 6. Priraštaj temperature određivan je kao razlika stabilizovanih funkcija temperatura na izlazu i ulazu prema sl. 6a.

Na slici 6b prikazan je ovako određen priraštaj temperature u zavisnosti od pritiska napajanja. Ova funkcija je u potpunosti oblika određenog proračunski, jedino su sve vrednosti niže. Ovo je sasvim razumljivo ako se ima u vidu da proračun bazira na pretpostavci zadržavanja celokupne toplote u ulju, tj. da nema gubitaka ni provodjenjem ni prenošenjem ni zračenjem.

Ispitivanje krutosti radijalnog ležišta izvedeno je redukovanjem registrovanih pomeranja rukavaca vretena na sredinu ležišta, i određivanjem sila na istom mestu, tj. otpora oslonaca. Pri tome je vreteno posmatrano kao

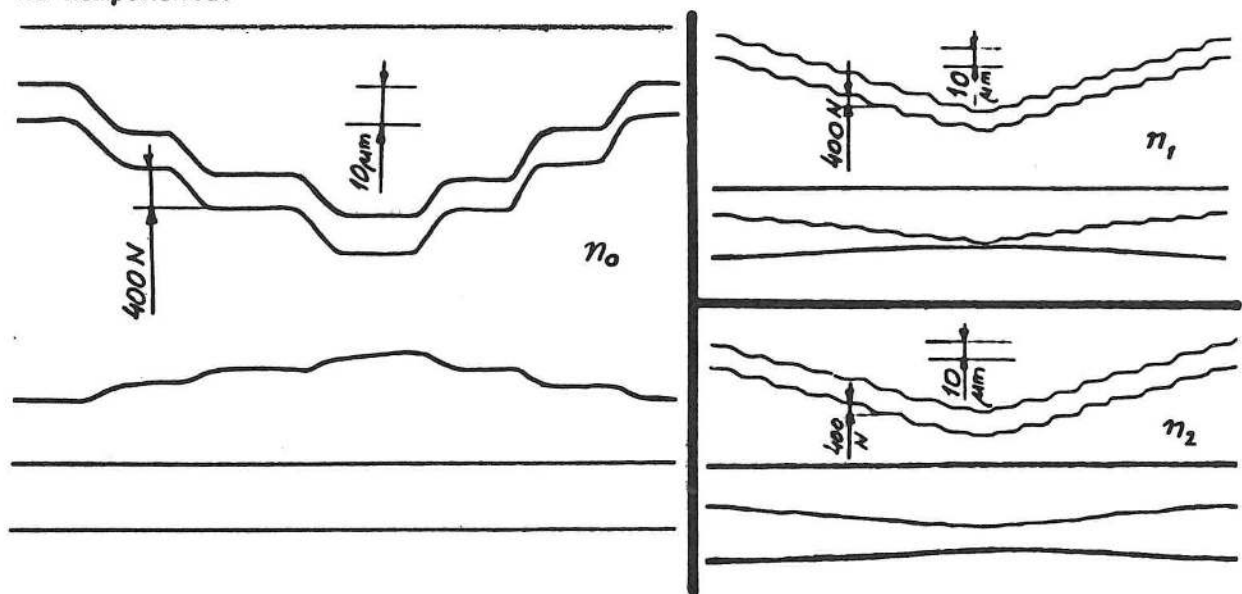
elastično kao i u [1]. Na slici 7 prikazani su zapisi snimljenih pomeranja i spoljnog opterećenja za pritisak 20 bar i brojeve obrtaja $n_0=0$, $n_1=1430$ o/min i $n_2=2820$ o/min. Raspored snimljenih veličina je prema šemi na slici 4.



Sl. 6. Zavisnost temperature od vremena (a) i pritiska (b)

Fig.6 The variation of temperature with time (a) and supply pressure (b)

Za razliku od n_0 , pri n_1 i n_2 prisutan je i hidrodinamički efekat koji dovodi do pomeranja vretena u horizontalnoj ravni (donje dve linije). Krutosti radijalnog ležišta izračunate prema izmerenim vrednostima veće su od proračunskih, što se objašnjava primenom modela vretena sa dva koncentrisana oslonca iako su ležišta dosta široka. Drugi razlog je prisustvo hidrodinamičke komponente krutosti, koja nije uzeta u obzir pri proračunu. Ona se, naime, može odrediti, ali je pitanje njenog udela u ukupnoj krutosti uz hidrostatičku komponentu.



Sl. 7. Registrovana pomeranja i opterećenja vretena

Fig.7 Registrated external force and spindle displacement

6. ZAKLJUČAK

Rezultati do sada izvedenih ispitivanja ukazuju na mogućnost vrlo preciznog odredjivanja performansi hidrostatičkih ležišta, odnosno ponašanja realizovane konstrukcije. Odstupanje pojedinih izmerenih vrednosti od proračunskih potvrđuje prisustvo odredjenih aproksimacija primenjenih na proračunskom modelu i ukazuje na velik značaj eksperimentalnog ispitivanja i primenjene metodologije merenja. Ova faza istraživanja takodje je doprinela postavljanju tehnologije izrade elemenata hidrostatičkog uležištenja kao vrlo važnog činioca za mogućnost industrijske proizvodnje što predstavlja konačan cilj ovog celog istraživanja.

REFERENCE

- [1] Borojev, Lj.: Hidrostatičko oslanjanje elemenata mašina alatki za završnu obradu, magistarski rad, FTN, Novi Sad, 1980.
- [2] Borojev, Lj., Gatalo, R., Rekecki, J.: Modeliranje proračuna hidrostatičkog uležištenja sa aspekta mogućnosti njegove automatizacije, IX internacionalni simpozijum BIAM '88, Zagreb, 1988.
- [3] Borojev, Lj.: Prilog razvoju metodologije projektovanja savremenih mašina alatki na bazi eksperimentalnog i računarskog modeliranja hidrostatičkog uležištenja visokopreciznih glavnih vretena, radni materijal doktorske disertacije, FTN, Novi Sad, 1989.
- [4] Rekecki, J., Zeljković, M., Siraki, B., Francuski, M., Borojev, Lj., Gatalo, R., Kosić, D., Čabarkapa, S., Hodolić, J., Romček, A., Petrović, Z.: Razvoj koncepcije modularnog projektovanja brusilica za spoljašnje i unutrašnje okruglo brušenje, istraživačko-razvojni projekat, Institut za proizvodno mašinstvo FTN, Novi Sad, 1987.
- [5] Rowe, W.B., O'Donoghue, J.P.: Design procedures for hydrostatic bearings, The Machinery Publishing Co., Brighton, 1971.
- [6] Stansfield, F.M.: Hydrostatic bearings for machine tools and similar applications, the Machinery Publishing Co., Brighton, 1970.
- [7] Voskresenskij, V.A., Dljakov, V.I., Zile, A.Z.: Rasčet i proektirovanie opor židkostnogo trenija, Mašinostroenie, Moskva, 1983.