

RADNI VEK KUGLIČNIH KOTRLJAJNIH LEŽAJA

TATJANA LAZOVIĆ

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET
2021



Tatjana Lazović

**RADNI VEK
KUGLIČNIH KOTRLJAJNIH LEŽAJA**

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

2021.

RADNI VEK KUGLIČNIH KOTRLJAJNIH LEŽAJA

Autor

Prof. dr Tatjana M. Lazović, dipl.inž.maš.

Recenzenti:

Prof. dr Radivoje Mitrović, dipl.inž.maš
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Miodrag Janković, dipl.inž.maš, profesor u penziji
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Ivana Atanasovska, dipl.inž.maš, naučni savetnik
Matematički institut SANU

Izdavač:

MAŠINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35
Tel.: 011-3370-350, 011-3302-384; Faks.: 011-3370-364
www.mas.bg.ac.rs

Za izdavača:

Prof. dr Radivoje Mitrović, dekan

Glavni i odgovorni urednik:

Prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom Dekana br. 18/2021 od 5.7.2021.

Tehnička priprema teksta, ilustracije i dizajn korica

T. Lazović

(korige - foto kredit: <https://cdn.hipwallpaper.com/i/44/1/YG4j70.jpg>)

Tiraž

100 primeraka

Štampa:

PLANETA PRINT
Igora Vasiljeva 33r, Beograd, Tel: 011-650-65-64
www.planeta-print.rs

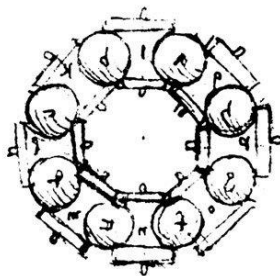
Beograd, 2021.

ISBN 978-86-6060-082-2

Zabranjeno preštampavanje i fotokopiranje. Sva prava zadržavaju izdavač i autor.

„... tehnologiju kotrljajnih ležaja smo preobratali od remek-dela u inženjersku nauku.“

Nils Arvid Palmgren, 1951.



Leonardo da Vinči, skica, XV vek



Izdavanje ove monografije je odobrilo
Nastavno-naučno veće Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
na sednici održanoj 24.12.2020. godine
Odluka br. 1715/3 od 25.12.2020. godine



Izdavanje ove monografije je finansijski podržalo
Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije,
na osnovu Prvog javnog poziva za učešće u sredstvima za sufinansiranje izdavanja
monografija u 2021. godini, raspisanog 20.01.2021. godine.
Rešenje o rasporedu sredstava nadležnog Ministarstva
broj 451-03-361/2021-14/2 od 27.4.2021. godine

Predgovor

Ključne reči ove monografije su: kotrljajni ležaji, kuglični ležaji, radni vek, ISO 281. Međutim, postoje ključne reči, koje bi trebalo da budu ispred svih navedenih, jer sve počinje od njih. To su: ljubav i posvećenost. Moja ljubav prema nauci, tehnici, univerzitetnoj inženjerskoj edukaciji i višedecenijska posvećenost teoriji kotrljajnih ležaja, koji su primarni predmet mojih istraživanja u magistarskoj tezi, doktorskoj disertaciji, kao i u naučnim i stručnim radovima.

Sadržaj monografije je rezultat mojih višegodišnjih istraživanja, zasnovanih na praćenju, prikupljanju i analizi publikovanih materijala, na temu radnog veka kotrljajnih ležaja. Ova monografija je pregledni rad, tako da obuhvata već objavljene sadržaje, ali sada svedene na suštinu predmeta istraživanja i prezentovane na prijemčiviji način. Rezultati i saznanja iz dostupnih naučnih i stručnih radova, koji su prema mom mišljenju trenutno najznačajniji za ovu oblast istraživanja, su sistematizovani tematski i/ili hronološki, pogodno prikazani i tumačeni, tako da budu razumljivi široj stručnoj čitalačkoj publici. Rad sadrži i deo rezultata mojih sopstvenih istraživačkih aktivnosti, sprovedenih u okviru projekata tehnološkog razvoja, finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS. Ti rezultati su objavljeni kroz niz timskih koautorskih naučnih radova, štampanih u naučnim časopisima i zbornicima sa naučno-stručnih skupova u zemlji i inostranstvu.

Važan aspekt monografije je ukazivanje na značaj standardizacije u oblasti kotrljajnih ležaja. Ako se svi, na globalnom nivou, pridržavamo istih međunarodnih standarda, onda su i rezultati našeg istraživačkog rada i konstruktorski poslovi uporedivi i adekvatno ocenjivi. Uvažavanjem i primenom standarda, svaki takav posao dobija internacionalni karakter, počev od oznaka veličina i definicija pojmova, preko geometrijskih parametara i različitih oblika proračuna, do opreme i procedura ispitivanja, akvizicije podataka i analize rezultata. U prikazu i analizi sadržaja standarda za proračun dinamičke nosivosti i radnog veka kotrljajnih ležaja, nisam imala nameru da pronalazim i naglašavam nedostatke i kritikujem predloženi postupak. Naprotiv,

imala sam želju da standardni proračun raščlanim na najbitnije celine i činioce, rastumačim ih i približim korisniku. Stručna i naučna javnost može biti zahvalna tvorcima standarda iz oblasti kotrljajnih ležaja, kao i ekspertima koji su bili ili jesu i sada uključeni u razvoj standarda (ISO). Oni su ulagali i ulažu velike napore da bi se postigao visok stepen uređenosti standardne metode proračuna radnog veka ležaja, mnogo veći nego u slučajevima proračuna nekih drugih mašinskih elemenata. Ukratko, detaljni prikaz standardnog postupka za proračun radnog veka kotrljajnih ležaja je u ovom radu u potpunosti afirmativan.

Možda neočekivano za naučne monografije iz oblasti tehničkih nauka, ovde su date biografije zaslužnih ličnosti u istraživanju kotrljajnih ležaja i razvoju matematičkog modela radnog veka ležaja. Smatrala sam da bi bilo zanimljivo predočiti čitaocima vreme i socijalno-ekonomske okolnosti u kojima su pojedini najzaslužniji istraživači živeli, radili i gradili osnove teorije radnog veka kotrljajnih ležaja, a drugi istraživači je nakon toga razvijali, sve do današnjih dana.

Nauka je istovremeno nacionalna i internacionalna. Danas, da bi naučni rad dobio na značaju, mora biti potvrđen i prihvaćen od strane šire naučne i stručne javnosti. Da bi rezultati naučnih istraživanja bili razmatrani, ocenjivani i objavljeni u odgovarajućim naučnim publikacijama, neophodno je da budu opisani na engleskom jeziku. To je razumljivo i tako se danas i postupa u svetskoj naučnoj populaciji. Engleski jezik je postao univerzalni jezik komunikacije na globalnom nivou, ne samo u svetu nauke, već i u drugim socijalnim sferama. Na taj način, konkretno u oblasti tehničkih nauka na nacionalnom nivou, polako blede i gubi se jedno od najvažnijih obeležja nacionalnog identiteta, a to je jezik. U ovom slučaju, to su tehnički pojmovi i stil pisanja naučnih tekstova iz oblasti mašinske tehnike. Naučne radove, već potvrđene i ocenjene objavljivanjem u međunarodnim časopisima i na međunarodnim konferencijama, trebalo bi napisati i na srpskom jeziku, objavljivati ih u domaćim časopisima, na domaćim skupovima i u monografijama nacionalnog značaja. Na taj način se možda ne dobija veliki broj formalnih poena vrednovanja naučnog rada, ali se svakako lokalno neguje i razvija tehnička terminologija i stil pisanja tehničkog teksta. Naravno, pored forme, još je bitniji sadržaj, kojim se povećava ukupni fond naučnih tekstova na srpskom jeziku, a to je od nacionalnog interesa. U tom pogledu, veliku odgovornost ima i nacionalna organizacija za standarde, kada se međunarodni ISO standardi, pisani na engleskom jeziku, prevode na srpski jezik. I, na kraju, sve to doprinosi kvalitetnijem sadržaju i formi udžbeničke literature iz oblasti mašinske tehnike u domaćem sistemu stručnog inženjerskog obrazovanja.

Uvidom u elektronski katalog Narodne biblioteke Srbije, može se doći do podataka o publikacijama na temu kotrljajnih ležaja¹. U poslednjih dvadeset godina, objavljeno je samo šest takvih knjiga² (!), među kojima su dve naučne monografije, a ostale su priručnici i/ili udžbenici. Na univerzitetima Srbije, u okviru kojih se studira mašinska tehnika i postoje predmeti koji se bave mašinskim elementima, postoji i odgovarajuća udžbenička literatura. Ona, pored svih ostalih, obuhvata i lekcije o kotrljajnim ležajima. Analizom sadržaja tih udžbenika, može se zaključiti da u mnogim od njih nije prikazan trenutno aktuelan i standardizovan postupak proračuna radnog veka kotrljajnih ležaja, koji preporučuju i proizvođači ležaja u najnovijim izdanjima kataloga svojih proizvoda. Proračun se sprovodi sa korekcionim faktorima, koji više ne postoje u zvaničnom standardnom izrazu za radni vek, već su zamenjeni drugim. Takođe, u udžbenicima su date pogrešne vrednosti faktora pouzdanosti, koje su odavno u standardu revidirane i izmenjene. Autori udžbenika te podatke ne ažuriraju, čak ni u više puta ponovljenim izdanjima. Prema izrazima za radni vek, koji se kontinuirano prepisuju iz starih izdanja udžbenika, dinamička nosivost ležaja se koriguje uticajnim faktorima, zavisno od proizvođača i radne temperature ležaja, a da to standardom nije predviđeno. Jednostavno rečeno, proračuni kotrljajnih ležaja u mnogim univerzitetskim³ udžbenicima i priručnicima o kotrljajnim ležajima su zastareli, prevaziđeni i ne daju pravu sliku procene radnog veka kotrljajnih ležaja. Zbog „uspavanosti“ i „inertnosti“ naše udžbeničke literature, studenti se dovode u zabludu, jer se ono što uče o proračunu radnog veka kotrljajnih ležaja razlikuje od postupka koji kasnije, kao inženjeri, primenjuju u praksi.

Sve napred navedeno su razlozi moje višegodišnje želje i odluke da napišem i objavim monografiju ovakvog koncepta i sadržaja.



Monografija ima pet poglavlja. Pažljivi čitač „od korice do korice“ će primetiti izvesna ponavljanja materije, fokusirane sa različitih pozicija

¹ <https://plus.sr.cobiss.net/opac7/bib/search?q=kotrljajni+le%C5%BEaji&db=nbs&sort=pyd&mat=allmaterials&start=0>

² 1) Krsmanović V., Mitrović, R.: *Klizni i kotrljajni ležaji*, udžbenik, 2015; 2) Lazović, T.: *Abrazivno habanje kotrljajnih ležaja*, knjiga, 2014; 3) Ašonja, A., Adamović, Ž., Gligorić, R.: *Izbor i dimenzionisanje kotrljajnih ležaja*, knjiga, 2010; 4) Ašonja, A., Adamović, Ž.: *Održavanje kotrljajnih ležaja*, knjiga, 2010; 5) Mitrović, R.: *Kotrljajni ležaji*, priručnik, 2004; 6) Ristivojević, M., Mitrović, R.: *Raspodela opterećenja – zupčasti parovi i kotrljajni ležaji*, knjiga, 2002.

³ Srednjoškolski udžbenici iz Mašinskih elemenata za tehničke i mašinske škole u ovoj analizi nisu razmatrani, ali se može pretpostaviti slično stanje predmetnog sadržaja

na istu temu. Upravo mi je ideja bila da se poglavlja mogu čitati i razumeti kao pojedinačne nezavisne celine, prema interesovanju različitih čitalaca za pojedine teme. U nekim slučajevima su isti termini opisani i objašnjeni na različite načine, jer je pristup zavisio od teme i konteksta sadržaja celokupnog poglavlja. Različiti autori iste veličine označavaju različitim oznakama, ali se dešava i suprotno, da različite veličine imaju istu oznaku. Da bi se izbegle zabune u tumačenju fizičkih veličina, a i očuvala autentičnost originalnih radova, u većini slučajeva su zadržane oznake iz citiranih referenci. Izuzetak su sopstveni radovi autora, u kojima je označavanje veličina usaglašeno sa standardnim oznakama, zbog mog ličnog stava da bi se trebalo prilagoditi standardu i međunarodnim oznakama, kako u naučnim i stručnim radovima, tako i u udžbeničkoj literaturi. Radi lakšeg snalaženja, na početku je dat pregled svih veličina, pomenutih u radu, sa navedenim izrazima ili tablicama u kojima se koriste. U radu su ponegde isti izrazi ponovljeni. To je urađeno radi lakšeg praćenja teksta, da čitalac ne bi tražio te izraze u prethodnim poglavljima, a i zato što su pojedini izrazi i veličine korišćeni u različitim kontekstima i računskim postupcima.



Prikupljanje građe o radnom veku ležaja, istraživanje podataka o radu ISO organizacije, traganje za istorijskim i biografskim činjenicama, proučavanje i sistematizacija rezultata naučnih istraživanja, kao i samo pisanje monografije su mi pričinili veliko zadovoljstvo i radost. Tu svoju radost sam već podelila sa prvim čitaocima rukopisa – mojim poštovanim i dragim kolegama i koleginicom recenzentima.

Profesoru dr Radivoju Mitroviću se zahvaljujem za podstrek, odobravanje i potpuno razumevanje zamišljenog i planiranog koncepta preglednog rada, popularno napisanog za istraživače i stručnjake koji se bave kotrljajnim ležajima, mašinskim elementima i opštim mašinskim konstrukcijama, ali i za širu stručnu čitalačku publiku.

Veliku zahvalnost za podršku, vrlo detaljnu kritičku analizu rukopisa, korisne savete, sugestije i podsticaj na dalje kreativno razmišljanje, izražavam prema uvaženom profesoru dr Miodragu Jankoviću.

Više od jedne decenije saradujem sa dr Ivanom Atanasovskom, na suštinskim sadržajnim i jezičkim tumačenjima međunarodnih standarda. Zahvalna sam joj na plodnim diskusijama, deljenju sumnji, razmišljanja i zaključaka u rešavanju inženjerskih i jezičkih nedoumica i problema, u domenu standardizacije, sadržaja ove monografije, ali i mnogo šire u oblasti tehničkih i drugih nauka.

Profesor dr Mileta Ristivojević, sa Katedre za Opšte mašinske konstrukcije Mašinskog fakulteta u Beogradu, me je uveo u svet standarda i standardizacije i na tome sam mu zahvalna. Predložio me je za člana dve komisije za standarde i srodne dokumente Instituta za standardizaciju Srbije (ISS), u kojima sam angažovana od 2009. godine. To su: KS M010 *"Tehnički crteži, tolerancije, zupčanici, ležaji i navojni spojevi"* i KS M199 *"Bezbednost mašina"*. Zahvaljujem se kolegici Ivani Topalović, dipl.inž.maš, samostalnom savetniku – inženjeru standardizacije ISS i sekretaru gore navedenih komisija, na korisnim konsultacijama i informacijama iz sfere delatnosti Međunarodne organizacije za standardizaciju ISO i ekvivalentne domaće organizacije ISS. Hvala i mojoj ćerki Emi Kapor, za pomoć u prevođenju tekstova napisanih na nemačkom jeziku, kao i za nabavljanje meni vredne literature iz dalekih inostranih knjižara i antikvarnica.

I, naravno, unapred se zahvaljujem svim zainteresovanim čitaocima, na vremenu i pažnji koje budu udelili čitanju ove monografije.

U Beogradu, jula 2021. g.



Dr Tatjana Lazović, dipl.inž.maš.
redovni profesor
na Katedri za Opšte mašinske konstrukcije
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Sadržaj

Oznake veličina	1
Skraćenice	11
1. Uvod	13
2. Istorijski pogled	17
2.1 Teorija radnog veka	24
2.2 Zasluzne ličnosti	25
ARVID PALMGREN	26
HAJNRIH HERC	30
RIHARD ŠTRIBEK	32
HARALD SJEVAL	34
VALODI VEJBUL	36
2.3 Rad "Die Lebensdauer von Kugellagern" N.A. Palmgrena	38
3. ISO	45
3.1 Istorijat	45
3.2 Struktura	49
3.3 Tehnički komiteti	50
3.3.1 Tehnički komitet ISO/TC 4 – Kotrljajni ležaji	51
3.3.2 Potkomitet ISO/TC 4/SC 8 – Nosivost i radni vek	52
3.4 Evolucija ISO 281 standarda	54
4. Radni vek	62
4.1 Uzroci otkaza	64
4.2 Rasipanje radnog veka	66
4.3 Stohastički pristup proceni radnog veka	68
4.4 Osnovni radni vek	73
4.4.1 Dinamička nosivost	75
Dinamička radijalna nosivost	75
Dinamička aksijalna nosivost	79
4.4.2 Dinamičko ekvivalentno opterećenje	82
Dinamičko radijalno ekvivalentno opterećenje	82
Dinamičko aksijalno ekvivalentno opterećenje	88

4.5	Korigovani radni vek	91
4.5.1	Korekcionni faktor a_1	92
4.5.2	Korekcionni faktor a_2	93
4.5.3	Korekcionni faktor a_3	94
4.6	Modifikovani radni vek	95
4.6.1	Modifikacionni faktor a_1	95
4.6.2	Modifikacionni faktor a_{ISO}	99
	Relativna viskoznost maziva κ	101
	Faktor kontaminacije e_c	103
	Granično zamorno opterećenje ležaja C_u	111
4.6.3	Ostali uticaji	124
	Habanje	124
	Korozija	126
	Cirkularni i zaostali naponi	127
	Temperatura	128
	Tvrdoća čestica nečistoća	129
4.6.4	Tehnička specifikacija ISO/TS 16281:2008	130
	Raspodela opterećenja na kotrljajna tela ležaja	136
5.	Vek istraživanja radnog veka	142
5.1	Haris, Ioanidis, Zaretski	144
5.2	Teorije osnovnog radnog veka	146
5.3	Korekcija izraza za osnovni radni vek	153
5.3.1	Modifikacionni faktor a_{XYZ}	155
	$a_{XYZ} = a_{SKF}$	157
	$a_{XYZ} = a_{DIN}$	159
	$a_{XYZ} = a_{NSK}$	160
5.3.2	Površinski iniciran zamor	166
5.4	Drugi doprinosi	170
5.4.1	Mazivo i kontaktne površine	170
5.4.2	Zamor	174
5.4.3	Raspodela opterećenja, unutrašnja geometrija, naleganja	186
Prilog	201
Prilog A	Štribekov model raspodele opterećenja	203
Prilog B	Vejbulova raspodela primenjena na kotrljajne ležaje	206
Prilog C	Faktor dinamičke nosivosti f_c	209
Prilog D	Parametar e i faktori X i Y dinamičkog ekvivalentnog radijalnog opterećenja	212
Prilog E	Parametar e i faktori X i Y dinamičkog ekvivalentnog aksijalnog opterećenja	218
Literatura	221

1

Uvod

U procesu konstruisanja uležištenja obrtnih delova mašina, konstruktor ne konstruiše kotrljajne ležaje i ne razrađuje radioničku dokumentaciju za njihovu izradu. Kotrljajni ležaji se nabavljaju na tržištu, kao kompletni podsklopovi, izabrani za konkretnu primenu, a na osnovu određenih kriterijuma. Izbor kotrljajnih ležaja zavisi od:

- prečnika rukavca vratila i raspoloživog prostora u uležištenju,
- intenziteta i karaktera opterećenja (radijalno, aksijalno ili kombinovano),
- učestanosti obrtanja,
- nagiba vratila u osloncima,
- primenjenog maziva i načina podmazivanja (ulje koje cirkuliše – sa filtriranjem ili bez filtriranja, uljna kada, mast koja se povremeno periodično dodaje, trajno podmazivanje mašću – „za ceo vek”),
- temperature radnog okruženja,
- kontaminacije radnog okruženja (mineralne čestice, produkti habanja drugih delova mašine, voda, vodena para, druge tečnosti i njihove magle ili pare) i
- radnog veka, koji ležaj treba da ispuni sa određenom pouzdanošću.

Na osnovu navedenih radnih uslova i odgovarajućih kriterijuma, vrši se izbor tipa i dimenzija (serije) ležaja. U tom postupku, minimalna potrebna dinamička nosivost ležaja C se određuje na osnovu opterećenja ležaja P , zadatog potrebnog radnog veka L i izraza za osnovni radni vek kotrljajnih ležaja:

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p \left[10^6 \text{ obrtaja} \right].$$

Sa druge strane, kada se imaju saznanja o tipu i dimenzijama ležaja, kao i uslovi opterećenja, a potrebno je sa pouzdanošću od 90% odrediti koliko dugo će ležaj raditi bez otkaza, onda se osnovni radni vek ležaja (izražen u milionima obrtaja) može odrediti na osnovu istog, gore navedenog izraza.

Za razliku od većine mašinskih elemenata i delova, kod koji se nosivost i radna sposobnost proveravaju određivanjem stepena sigurnosti, kod kotrljajnih ležaja se proverava radni vek. Međutim, poput stepena sigurnosti, koji predstavlja odnos kritičnog i radnog napona (opterećenja) mašinskog dela, i radni vek ležaja predstavlja odnos jedne kritične veličine (dinamička nosivost ležaja C) i jedne radne veličine (ekvivalentno opterećenje ležaja P), sa eksponentom p , čija vrednost zavisi od oblika kotrljajnih tela ležaja ($p = 3$ za kuglične ležaje; $p = 10/3$ za valjčane ležaje). Za konkretne poznate radne uslove podmazivanja, filtriranja i kontaminacije, kao i pouzdanosti različite od 90%, osnovni radni vek ležaja treba korigovati odgovarajućim faktorima (a_1 za pouzdanost i a_{ISO} za radne uslove):

$$L = a_1 a_{ISO} \left(\frac{C}{P} \right)^p \left[10^6 \text{ obrtaja} \right].$$

Ovo je standardizovani izraz za radni vek kotrljajnih ležaja, trenutno aktuelan i merodavan u proizvodnji ležaja, industrijskoj eksploataciji i inženjerskoj edukaciji iz oblasti mašinskih elemenata i sistema. Da bi se u praksi odredio radni vek ležaja, tj. primenila formula za proračun radnog veka, potrebno je znati parametre radnih uslova i imati podatke o karakteristikama ležaja. Sve vrednosti u izrazu za radni vek se određuju na osnovu tih podataka, datih u obliku odgovarajućih tablica i/ili dijagrama u katalogima proizvođača ležaja. Proračun je sveden na minimum i koristi se samo za jednostavno određivanje ekvivalentnog opterećenja P i samog radnog veka L . Ali, "put" do jednostavnog oblika i primene formule radnog veka ležaja je "popločan" složenom multidisciplinarnom teorijom, verifikovanom milionskim brojem eksperimentalnih testova. Ova teorija se "rodila" pre skoro sto godina i još uvek živi, raste, dopunjava se i usavršava.

Kotrljajni ležaji su se industrijski proizvodili u specijalizovanim fabrikama mnogo godina pre nastanka teorije o njihovom radnom veku. Tada je svaki proizvođač ležaja, na svoj neki način, verovatno pretežno empirijski, vršio procenu o nosivosti i trajanju svojih proizvoda. U tom slučaju, da bi se došlo do što je moguće tačnijih predstava o nosivosti i radnom veku ležaja iz celokupnog proizvodnog programa, trebalo je obaviti testove sa velikim brojem uzoraka. A to znači, sprovesti skupa i

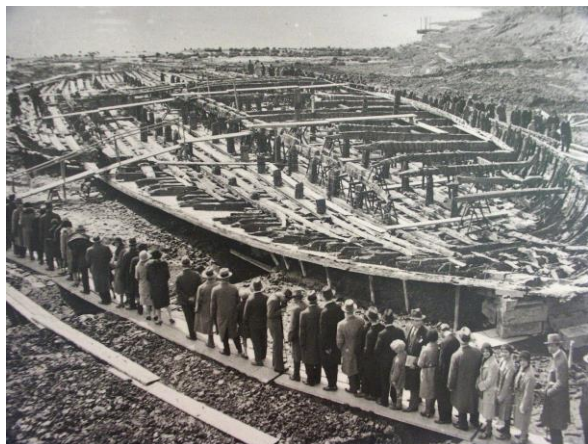
2

Istorijski pogled

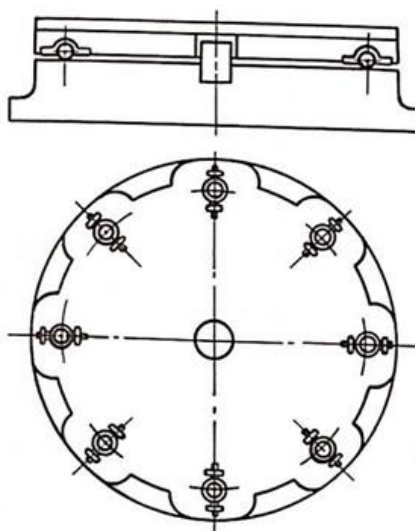
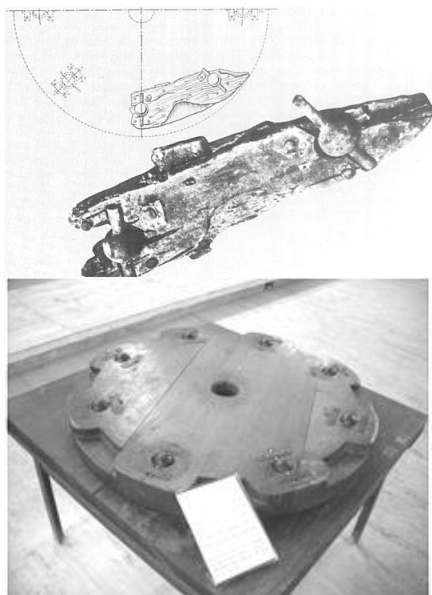
Kratak pregled istorijskog razvoja kotrljajnih ležaja, dat je na osnovu sadržaja uvodnog poglavlja knjige Hadsona Mortona „Antifrikcioni ležaji“ iz 1965. godine [1].

Najstariji do sada pronađen kotrljajni ležaj potiče iz doba Rimskog carstva. To je neki vid aksijalnog ležaja, koji se sastoji od dva drvena diska sa zajedničkom vertikalnom osovinom, čvrsto povezanom sa donjim diskom, oko koje se gornji disk slobodno okretao. Između njih se nalazilo osam bronzanih kugli sa osovinicama, smeštenih u odgovarajuća udubljenja na gornjem disku. Smatra se da su ove rotirajuće platforme korišćene za prikazivanje kamenih skulptura tog vremena. 1928. godine, isušivanjem jezera Nemi u Italiji (30 km jugoistočno od Rima), na dnu jezera su pronađeni ostaci dva broda i velikog broja raznih relikvija iz vremena imperatora Kaligule (37. godina nove ere). Među njima su bili i delovi prvog kotrljajnog ležaja, koji su danas sa svim ostalim pronađenim i sačuvanim predmetima izloženi u Nacionalnom muzeju u Rimu.

Renesansni inženjerski genije Leonardo da Vinči (1452-1519) je izumeo nekoliko konstrukcijskih preteča savremenih kotrljajnih ležaja. One se mogu videti u njegovim skicama, kao delovi izuma mehanizama i mašina sa obrtnim kretanjem (vozila, letelica, mlinova, dizalica). U XVI veku su publikovani radovi G. Agricola: „De Re Metallica“ i A. Ramelli: „Le Diverse et Artificiose Machine“, u kojima su opisane konstrukcije ležaja, koje bi se, sa sadašnjeg aspekta, mogle smatrati ranim pretečama današnjih kotrljajnih ležaja. U XVIII veku je napravljen korak napred, konstrukcijom Mondranove kočije. Osovine kočije su bile oslonjene na kotrljajne ležaje, tada sertifikovane od strane Pariske akademije nauka. Mondran je to slikovito opisao izjavom da „Zahvaljujući kotrljajnim ležajima, jedan konj lako može da vuče kočiju, koju su ranije jedva vukla dva konja“.



Italija, 1930.
Brod rimskog
imperatora
Gaja Julija Cezara
Germanika - Kaligule
(12 - 41 n.e.),
rekonstruisan na
osnovu delova
pronađenih u jezeru
Nemi (kasnije, u II
svetskom ratu,
je uništen)¹



Originalni delovi prvog kotrljajnog ležaja (gore levo)², crtež pretpostavljene konstrukcije [1] (desno) i model – rekonstrukcija³ (dole levo)

¹ Smatra se da je izgrađeno više ovakvih brodova, preteča današnjih luksuznih krstarećih putničkih brodova. To su bile ploveće palate, koje su imale vodovod i sistem grejanja, podove od mozaika, tropske biljke, mermerne statue, koje su se okretale na drvenim kotrljajnim platformama (prvi aksijalni kotrljajni ležaji)

² foto kredit: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5_331

³ Ceccarelli, M., Ceccarelli, S., Conti, C.E., Martines, G.: *Ball Bearings from Roman Imperial Ships of Nemilake*, Advances in Historical Studies, Vol.8, №3, 2019

3

ISO

ISO je Međunarodna organizacija za standardizaciju. Iako naziv „ISO“ izgleda kao skraćenica naziva organizacije, ipak to nije. Naime, skraćenica naziva na engleskom jeziku bi bila IOS (*International Organization for Standardization*), na francuskom OIN (*Organisation Internationale de Normalisation*), tj. na svakom jeziku Organizacija bi imala svoju, drugačiju, skraćenicu. Zato su osnivači odlučili da joj daju naziv ISO, izveden od grčke reči „isos“ (*ἴσος*), što znači „jednako“.

ISO je nezavisna samostalna nevladina međunarodna organizacija koja se bavi razvojem i objavljivanjem međunarodnih standarda. Osnovana je 1947. godine i od tada je objavljeno 23931 standarda, koji pokrivaju skoro sve aspekte aktuelnih tehnologija, proizvoda i poslovanja. ISO je globalna mreža zvaničnih nacionalnih tela za standardizaciju i trenutno broji 165 članova, predstavnika zemalja članica. Razvojem standarda se bavi 796 komiteta i potkomiteta sa međunarodnim sastavom, a organizacija ima i 160 stalno zaposlenih administrativnih radnika u Centralnom sekretarijatu ISO, sa sedištem u Ženevi.

Kratki pregled istorijskog razvoja ISO sa pojedinim fotografijama je dat na osnovu sadržaja preuzetog sa Internet stranice Organizacije [16]. Više i detaljnije o nastanku i razvoju ISO se može pročitati u publikaciji [17], izdatoj povodom obeležavanja pedesete godišnjice ISO i dostupnoj na Internet stranici ISO.

3.1 Istorijat

Međunarodna Federacija Nacionalnih Asocijacija za Standardizaciju – ISA (*International Federation of the National standardizing Associations*) je osnovana u Pragu, 1928. godine. Prestala je sa radom 1942. godine, zbog Drugog svetskog rata. Posle rata, Federaciji je pristupio

novοformirani Komitet za Koordinaciju Standarda Ujedinjenih Nacija UNSCC (*United Nations Standards Coordinating Committee*), sa predlogom da se formira nova svetska organizacija za standarde.



Ploča na zgradi u Pragu, u kojoj je 1928. g. osnovana ISA federacija, preteča ISO

Odluka o formiranju Međunarodne organizacije za standardizaciju – ISO je doneta u oktobru 1946. godine, kada su se predstavnici 25 zemalja članica ISA i UNSCC sastali u Londonu i razgovarali o potrebi i budućnosti međunarodne standardizacije u oblastima različitih tehnologija i proizvoda. Osnivači su tada odlučili da buduća organizacija mora biti otvorena za svaku zemlju na svetu, koja bude želela da sarađuje, sa jednakim pravima i obavezama.

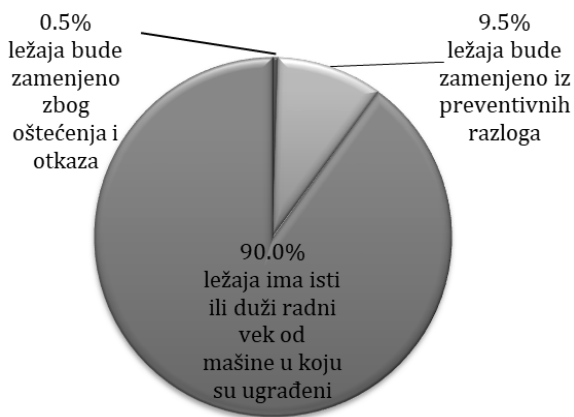


Osnivači ISO, London, 1946

4

Radni vek

Radni vek kotrljajnog ležaja je broj ciklusa opterećenja (broj obrtaja) ili vreme rada ležaja do otkaza. Otkaz kotrljajnog ležaja je gubitak njegove radne sposobnosti zbog razaranja jednog ili više delova ležaja – prstenova, kotrljajnih tela, kaveza.



Slika 4.1. Radni vek kotrljajnih ležaja [34]

Svake godine u svetu bude proizvedeno oko 10 milijardi komada kotrljajnih ležaja [34]. Približno 90% tih ležaja radi bez otkaza onoliko vremena, koliko i uređaji u koje su ugrađeni (Sl.4.1). Iz preventivnih razloga ili u okviru rutinskog redovnog održavanja i zamene nekih drugih delova mašinskog sistema, 9,5% od ukupno proizvedenih i ugrađenih ležaja bude zamenjeno pre vremena predviđenog otkaza, iako se nalaze u dobrom tehničkom stanju i u funkciji. Samo oko 0,5% ležaja bude zamenjeno zbog oštećenja i otkaza. Polovina procenta izgleda malo, ali je to zapravo 50 miliona komada oštećenih i otkazalih ležaja u svetu, samo u jednoj godini. Upravo zbog ovog podatka, postoji potreba

da se smanji broj neočekivanih prevremenih otkaza kotrljajnih ležaja. To se može ostvariti na dva načina: objektivnim povećanjem radnog veka ležaja i/ili tačnijom i pouzdanijom procenom radnog veka ležaja.

Objektivno povećanje radnog veka ležaja se ostvaruje povećanjem kvaliteta ležaja, pravilnom ugradnjom i korektnom eksploatacijom. Kvalitet ležaja se povećava optimizacijom unutrašnje geometrije (dimenzije i oblik kotrljajnih tela, staza kotrljanja, kaveza), primenom kvalitetnijih ili novih materijala (čelika visoke čistoće, polimera, keramike), usavršavanjem tehnologije izrade i obrade delova ležaja i sklapanja ležaja. Pravilna ugradnja ležaja u uležištenja podrazumeva izbor adekvatnog tipa i dimenzija ležaja, kao i adekvatnih naleganja ležaja u kućištu i na rukavcima, primenu odgovarajućih alata, uređaja i kontrolnih instrumenata za ugradnju i dr. Korektna eksploatacija podrazumeva dobar izbor sistema podmazivanja, vrste maziva za date radne uslove, efikasno zaptivanje, redovnu dopunu ili zamenu maziva, održavanje sistema filtriranja, monitoring stanja (merenje temperature, vibracija i buke, kojima se oštećenja ležaja detektuju u ranim fazama).

Sa druge strane, što je moguće tačnija procena radnog veka ležaja indirektno utiče na povećanje radnog veka. To znači, da ležaj sa dobro proračunatim radnim vekom, neće otkazati pre isteka tog roka, u granicama određene pouzdanosti. Dobro proračunat radni vek znači postojanje dobrog matematičkog modela, tj. formule za izračunavanje radnog veka. Takav matematički model treba da uzima u obzir što je moguće više identifikovanih uticajnih parametara na radni vek ležaja. Razvoj metode proračuna radnog veka kotrljajnih ležaja je započeo '20-ih godina XX veka i još uvek traje. Prvim istraživanjima u ovoj oblasti su se bavili i značajni doprinos dali: Štribek, Sjeval, Palmgren i Lundberg, a zatim i Haris i Ioanidis, Zaretski i dr.

Procedura proračuna radnog veka je u međuvremenu i standardizovana. U tom pogledu, značajni su nacionalni standardi Nemačke, Švedske, SAD, čije verzije su često bile osnova za razvoj međunarodnog ISO standarda za kotrljajne ležaje. Nacionalni standardi navedenih zemalja su se zasnivali na velikom iskustvu nacionalnih proizvođača ležaja, koji su ujedno i najznačajniji svetski proizvođači ležaja i u današnje vreme. Međunarodni ISO standard za proračun dinamičke nosivosti i radnog veka kotrljajnih ležaja je doživeo više verzija, zbog unapređenja, sticanja novih znanja i njihovog implementiranja u matematički model radnog veka. Poslednja verzija je publikovana 2007. godine, a aktivni rad na dopuni i usavršavanju standarda traje i u današnje vreme, tako da se u skorij budućnosti svakako može očekivati ažurirana verzija i precizniji model standardnog proračuna radnog veka kotrljajnih ležaja.

5

Vek istraživanja radnog veka

Početak razvoja tehnologije kotrljajnih ležaja, kao i njihove industrijske proizvodnje, smatra se pronalazak i razvoj konstrukcije pedalnog bicikla 1868. godine [87]. Herc je razvio svoju teoriju kontakta elastičnih tela 1881. godine, a Štribek je 1901. godine prezentovao svoj model raspodele opterećenja u kugličnom kotrljajnom ležaju. Osnovni koncept radnog veka kotrljajnih ležaja je na samom početku '20-ih godina prošlog veka razvio Palmgren i objavio 1924. godine. Zatim je zajedno sa Lundbergom svoju teoriju dopunio stohastičkim pristupom problemu procene radnog veka i objavio je 1947. i 1952. godine. Narednih godina se pokazalo da njihov matematički model radnog veka odgovara većini rezultata ispitivanja radnog veka, koja su tada sprovodili proizvođači kotrljajnih ležaja. Vodeći proizvođači tog vremena, iz Švedske, SAD i Nemačke, su se udružili u zajedničkom naporu da se formira jedinstvena standardizovana formula za proračun radnog veka ležaja, što bi bilo na opštu dobrobit i proizvođača i korisnika kotrljajnih ležaja. Proizvođači ležaja su posedovali rezultate ispitivanja radnog veka svojih proizvoda. Te rezultate je prikupila Američka asocijacija za standarde¹, zahtevajući od Nacionalnog biroa za standarde², tj. njemu pripadajućeg Komiteta za kuglične i valjčane kotrljajne ležaje³, da ih obradi i zatim sastavi odgovarajući izveštaj.

¹ ASA – American Standards Association, pod tim nazivom posluje od 1928. Prethodno, od 1918. godine, to je bio Komitet za inženjerske standarde AESC (American Engineering Standards Committee). ASA 1966. godine menja naziv u Institut za standardizaciju Sjedinjenih Američkih Država USASI (United States of America Standards Institute), a 1969. godine postaje Američki nacionalni institut za standarde, danas poznat kao ANSI (American National Standards Institute).

² National Bureau of Standards (NBS), osnovan 1901. godine. Današnji naziv Nacionalni institut za standarde i tehnologiju NIST (National Institute of Standards and Technology) ima od 1988.godine.

³ ASA Committee B-3 (Ball and Roller Bearings)

Rezultati detaljne statističke obrade dobijenih podataka o ispitivanju radnog veka kotrljajnih ležaja su objavljeni u radu [88] iz 1956. godine. Prema ovom izveštaju, obavljeno je 213 serija testova i analizirano 4948 kugličnih kotrljajnih ležaja. Raspolagali su podacima od četiri proizvođača ležaja, a od jednog od tih proizvođača, i podacima za tri različita tipa kugličnih ležaja. U izveštaju nije navedeno o kojim proizvođačima se radi, ali se može pretpostaviti da potiču iz zemalja koje su nosioci ove inicijative. Istovremeno, nezavisna istraživanja je sprovodio Tibor Talijan (SKF Filadelfija, SAD) i svoje rezultate objavio 1976. godine [61,62]. On je ispitao 2500 ležaja pod različitim radnim uslovima i utvrdio da do otkaza ležaja ne dolazi samo usled potpovršinskog zamora, što je osnovna pretpostavka Palmgrenova, već na radni vek ležaja ima uticaj i površinski izazvan zamor [45]. Ipak, originalni Lundberg-Palmgrenov matematički model radnog veka ležaja, zasnovan na potpovršinskom zamoru materijala staza kotrljanja, je ostao „nukleus“ svih daljih istraživanja – postojeća bazna teorija, koja se širila i dopunjavala [89].

Lundberg-Palmgrenova metoda proračuna radnog veka kotrljajnih ležaja je prevagnula u odnosu na sve druge, mada malobrojne, metode i 1962. godine je prihvaćena od strane međunarodne organizacije za standardizaciju ISO. Ova prva verzija standardnih preporuka za proračun dinamičke nosivosti i radnog veka je direktni rezultat nacrtu predloženog od strane švedskog predstavnika u ISO, A. Palmgrenova, na osnovu praktičnog i istraživačkog iskustva stečenog tokom dve decenije rada u kompaniji za proizvodnju ležaja SKF. Predložena metoda je prethodno proverena i potvrđena i od strane Američkog biroa za standardizaciju [89]. Standardizacija metode određivanja nosivosti i radnog veka kotrljajnih ležaja je od esencijalnog značaja za mašinsku industriju, jer omogućava jednostavnije sastavljanje specifikacija proizvoda u složenim i masovnim proizvodnjama, kao i kompatibilnost i zamenljivost kotrljajnih ležaja širom sveta. Na osnovu dinamičke nosivosti ležaja, korisnik može da vrši upoređivanje ležaja različitih proizvođača. Međutim, standardi se ne donose jednom za sva vremena. Oni se menjaju, dopunjuju, usklađuju sa novim otkrićima nauke i tehnike u predmetnoj oblasti. Zato i zasedaju komiteti, sastavljeni od eminentnih stručnjaka u konkretnoj oblasti, na koju se standardi odnose. Pri tome, ili se oni sami bave istraživanjima kotrljajnih ležaja u okviru svojih institucija ili su eksperti, kvalifikovani i kompetentni da prate i primenjuju rezultate svih respektabilnih aktuelnih istraživanja i otkrića.

Iako je metoda proračuna radnog veka standardizovana, u svetu se nije stalo sa razvojem i istraživanjima u oblasti teorije kotrljajnih ležaja.

Literatura

1. Morton, H.T.: *Anti-Friction Bearings*, Ann Arbor, MI, 1965
2. Svenskt biografiskt lexikon: *N Arvid Palmgren*, art av Allan Palmgren, 2020
<https://sok.riksarkivet.se/sbl/artikel/7995>,
3. Svensk tidskrift för industriellt rättsskydd, 1925 – Fyrtioförsta årgången, 295, 2020
<http://runeberg.org/indratt/1925/0297.html>,
4. Palmgren, A.: *Die Lebensdauer von Kugellagern*, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Vol. 68, No .14, 1924, pp. 339-341 (prevod na engleski jezik: NASA Technical translation TT F-13460, NASA Washington, D.C., USA, 1971)
5. Lundberg, G., Palmgren, A.: *Dynamic Capacity of Rolling Bearings*, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, Vol. 1, №3, The Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, 1947
6. Lundberg, G., Palmgren, A.: *Dynamic Capacity of Roller Bearings*, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, Vol. 2, №4, The Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, 1952
7. <http://doimap.freevnn.com/vl12-luongtuanhsang/Lien%20Ket/Noi%20dung/Hertz.htm?i=2>
8. Neue Deutsche Biographie: *Stribeck, Richard Hermann*, 2020
<https://www.deutsche-biographie.de/sfz106945.html>
9. Jacobson, Bo.: *The Stribeck memorial lecture*, Tribology International, 36, 2003, 781-789
10. Tekniska föreningen i Örebro 1875-1925: *Minnesskrift, Utgiven med anledning av föreningens femtioåriga verksamhet*, 444, 2020
<http://runeberg.org/tforebro/0444.html>
11. Sjövall, H.: *Belastningsfördelningen inom kul-och rullager vid givna yttre radial-och axialbelastningar*, Teknisk Tidskrift – Mekanik, 9, 1933, 97-102
12. Teknisk Tidskrift (1871-1962): 1933. *Mekanik*, 97-102, 2020
<http://runeberg.org/tektid/1933m/0099.html>

13. Manutenção e confiabilidade, *RCM-Reability Centered Maintenance, Waloddi Weibull – História Abernethy*, Extract from The New Weibull Handbook© by Dr. Robert B. Abernethy, 2020
<https://sites.google.com/site/manutencaoclassemundial/disciplinas/08---26-10---sexta/rcm-reability-centered-maintenance/waloddi-weibull--historia>
14. Zaretsky, E.: *Rolling bearing life prediction, theory, and application*, NASA/TP -2013-215305, NASA, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA, 2013
15. Janković, M.: *Pogonska čvrstoća*, monografija, Mašinski fakultet Beograd, 2011
16. ISO, <https://www.iso.org/about-us.html>
17. *Friendship among equals*, Recollections from ISO's first fifty years, ISO Central Secretariat, Genève, Switzerland, 1997
https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/about%20ISO/docs/en/Friendship_among_equals.pdf
18. Technical Report ISO/TR 8646-1985 *Explanatory notes on ISO 281/1-1977*
19. Technical Report ISO/TR 1281-1:2008 *Rolling bearings – Explanatory notes on ISO 281 – Part 1: Basic dynamic load rating and basic rating life*
20. Lazović, T., Topalović, I.: *Evolution of rolling bearing life rating through the standardization*, International Scientific Journal „Machines. Technologies. Materials“, Year XIV, Issue 6, 2020, 222-225
21. International standard ISO 281:1990 *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life*
22. Technical Specification ISO/TS 16799:1999 *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life – Discontinuities in the calculating of basic dynamic load ratings*
23. Ioannides, E.: *Life prediction in rolling element bearings*, Proceedings of I World Tribology Congress, London, 1997
24. Ioannides, E., Harris, T.A.: *A new fatigue life model for rolling bearings*, ASME Journal of Tribology, 107, 1985, 367-378
25. Amendment ISO 281:1990/AMD 1:2000 *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life – Amendment 1*
26. Amendment ISO/281:1990/AMD 2:2000 *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life – Amendment 2: Life modification factor aXYZ*
27. Cover story: *ISO 281:2007 bearing-life standard – and the answer is?*, Tribology and Lubrication Technology, 2010

28. Mitrović, R., Ristivojević, M., Lazović, T.: *Različiti pristupi proceni radnog veka kotrljajnih ležaja*, IX SEVER-ov simpozijum o mehaničkim prenosnicima, Subotica, 2003
29. International standard ISO 281:2007 *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life*
30. Technical Report ISO/TR 1281-2:2008 *Rolling bearings – Explanatory notes on ISO 281 – Part 2: Modified rating life calculation, based on a system approach to fatigue stresses*
31. Technical Corrigendum ISO/TR 1281-1:2008/COR 1:2009 *Rolling bearings – Explanatory notes on ISO 281 – Part 1: Basic dynamic load rating and basic rating life*
32. Technical Corrigendum ISO/TR 1281-2:2008/COR 1:2009 *Rolling bearings – Explanatory notes on ISO 281 – Part 1: Modified rating life calculation, based on a system approach to fatigue stresses*
33. Technical Specification ISO/TS 16281:2008 *Rolling bearings – Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings*
34. SKF Publication: *Bearing damage and failure analysis*, SKF Group, 2017
35. International Standard ISO 15243:2004 *Rolling bearings – Damage and failures – Terms, characteristics and causes*
36. Lai, J., Kadin, Y.: *Towards a better understanding of material imperfections*, SKF Evolution magazine, №3, 2018, 26-30
<https://evolution.skf.com/a-better-understanding-of-material-imperfections/>
37. Kuhnell, B.: *Wear in rolling element bearings and gears – How age and contamination affect them*, Machinery Lubrication, №9, 2004
<http://www.machinerylubrication.com/Read/664/wear-bearings-gears>
38. Harris, T.A., Kotzalas, M.N.: *Essential concepts of bearing technology*, Taylor & Francis Group, Boca Raton – London – New York, 2006
39. Weibull, W.: *A statistical theory of the strength of materials*, Ingeniörsvetenskapsakademiens (Royal Swedish Institute for Engineering Research), Handlingar (Proceedings), №151, Generalstabens litografiska anstalts förlag, Stockholm, 1939, 1-45
40. Lazović, T.: *Istraživanje abrazivnog habanja kotrljajnih ležaja*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007
41. Harris, T.A.: *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1984
42. SKF: General catalogue 6000 EN, 2005
43. Schaeffler Group (INA, FAG): *Rolling Bearing Catalogue HR1*, 2008

44. International standard ISO 3448:1992 *Industrial liquid lubricants – ISO viscosity classification*
45. Mitrović, R.: *Istraživanje uticaja konstruktivnih triboloških parametara kotrljajnog kugličnog ležaja na radnu sposobnost pri velikim učestanostima obrtanja*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1992
46. Lazović, T., Trišović, N., Milović, LJ.: *Modelling interaction between worn surface and abrasive particle based on their geometry and material properties*, Book of abstracts of 2nd Int. Conference on Material Modelling, ICMM2, Paris, France, 2011
47. Lazović, T., Mitrović, R., Mišković, Ž.: *Contact between abrasive particles and worn surfaces within rolling bearing*, Booklet of Abstracts: Mini-symposium "Contact Mechanics: Theory and Applications", Mathematical Institute of SASA, Belgrade, Serbia, 2017
48. Lazović, T.: *Abrazivno habanje kotrljajnih ležaja*, monografija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2014
49. Lazović, T., Marinković, A., Skoko, D.: *Influence of abrasive wear on ball bearing internal geometry*, Proceedings of 11th International Conference on Tribology – SERBIATRIB '09, Belgrade, Serbia, 2009
50. International standard ISO 4406:2017 *Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the level of contamination by solid particles*
51. International standard ISO 11171:2016 *Hydraulic fluid power – Calibration of automatic particle counters for liquids*
52. International standard ISO 16889:2008 *Hydraulic fluid power – Filters – Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element*
53. Deutsche norm DIN 51819-1:1999 *Testing rolling bearing lubricants using the FE 8 war test machine – principles*
54. International standard ISO 76:2006 *Rolling bearings – Static load ratings*
55. Mitrović, R.: *Analiza uticaja elastičnih deformacija i unutrašnjeg radijalnog zazora kotrljajnog kugličnog ležaja na raspodelu opterećenja na kotrljajna tela i nosivost*, Magistarska teza, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1987
56. Lazović, T.: *Analiza uticaja geometrije kotrljajnog ležaja na raspodelu opterećenje na kotrljajna tela i krutost*, Magistarska teza, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2000
57. Ковалев, М.П., Народецкий, М.З.: *Расчет высокоточных шарикоподшипников*, Машиностроение, Москва, 1975
58. Lazović, T., Varagić, S., Milović, LJ.: *Contact stresses and deformations in thrust ball bearing*, Machine design, Vol. 10, №3, 2018, 85-92

59. Sada, T., Mikami, T.: *Effect of lubricant film thickness on ball bearing life under contaminated lubrication: Part 3 – Reciprocal action of contamination and film thickness*, Journal of Japanese Society of Tribologists, 2005, 43-49
60. Ямпольский, Г.Я., Крагельский, И.В.: *Исследование абразивного износа элементов пар трения качения*, Наука, Москва, 1973
61. Tallian, T.E.: *Prediction of Rolling Bearing Contact Fatigue Life in Contaminated Lubricant: Part I – Mathematical Model*, Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol. 98, Series F, №2, 1976, 251-257
62. Tallian, T.E.: *Prediction of Rolling Bearing Contact Fatigue Life in Contaminated Lubricant: Part II – Experimental*, Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol. 98, №3, 1976, 384-392
63. Nelias, D.: *Contribution a l'Etude des Roulements. Modélisation globale des roulements et avaries superficielles dans les contacts EHD pour des surfaces réelles ou indentées, Dossier d'Habilitation a Diriger des Recherches, Institut National des Sciences Appliquées, Université Claude Bernard, Lyon, 1999*
64. Kelly, D.A., Hutchings, I.M.: *A new method for measurement of particle abrasivity*, Wear, 250, 2001, 76-80
65. Mitrović, R., Lazović, T.: *Analiza uticaja habanja na radni vek ležaja*, Zbornik radova sa VII Jugoslovenske konferencije o tribologiji, Beograd, 2001
66. Mitrovic, R., Lazovic, T.: *Influence of wear on deep groove ball bearing service life*, Facta universitatis, Series: Mechanical Engineering Vol. 1, No 9, 2002, 1117-112
67. Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M.: *Influence of abrasive particles geometry and material properties on the type of abrasive wear*, Proceedings of 8th International Tribology Conference – ITC '03, Belgrade, 2003
68. Fernández, J. E., Fernández, M.R., Diaz, R.V., Navarro, R.T.: *Abrasive wear analysis using factorial experiment design*, Wear, 255, 2003, 38-43
69. Lazović, T., Marinkovic, A.: *Influence of lubricant contamination on rolling bearing microgeometry*, Proceedings of ÖTG-SYMPOSIUM 2008
70. Lazovic, T., Mitrovic, R., Marinkovic, A.: *Influence of abrasive wear on the ball bearing service life*, Proceedings of European Conference on Tribology – ECOTRIB 2009, Pisa, Italy, 2009, 387-392
71. Lazovic, T., Marinković A.: *Influence of wear rate on the rolling bearing life, Solving Friction and Wear Problems*, Proceedings of 17th International COLLOQUIUM TRIBOLOGY, Technische Akademie Esslingen, Stuttgart/Ostfildern Germany, Manuscripts Proceedings, 2010

72. Laird, J.: *How temperature conditions affect bearing performance*, <https://www.bearingtips.com/category/featured/>
73. Ristivojević, M., Mitrović, R., Lazović, T.: *Investigation of causes of fan shaft failure*, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, №5, 2010, 1188-1194
74. Grünberg, U.: *Untersuchungen über den Einfluß des Spiels zwischen Außenring und Gehäuse auf die Tragfähigkeit radial belasteter Zylinderrollenlager, 1. Teil: Theoretische Grundlagen und Berechnung*, "Konstruktion" 22 Heft 2, 1970, 48-55
75. Grünberg, U.: *Untersuchungen über den Einfluß des Spiels zwischen Außenring und Gehäuse auf die Tragfähigkeit radial belasteter Zylinderrollenlager, 2. Teil: Praktische Anwendung und Ergebnisse*, "Konstruktion" 22 Heft 3, 1970, 97-103
76. Галахов, М.А., Бурмистров А.Н.: *Расчет подшипниковых узлов*, Машиностроение, Москва, 1988
77. Mitrović, R., Lazović, T., Ristivojević, M.: *Analiza raspodele opterećenja na kotrljajna tela ležaja*, Zbornik radova sa XXII Jugoslovenskog kongresa teorijske i primenjene mehanike, Vrnjačka Banja, 1997
78. Митрович, Р., Ристивоевич, М., Лазович, Т.: *Распределение нагрузки между телами качения шариковых подшипников*, Вестник машиностроения, 3/2000, 14-17
79. Lazović, T.: *Influence of internal radial clearance of rolling bearing on load distribution between rolling elements*, Journal of Mechanical Engineering Design, Vol. 4, №1, 2001, 25-32
80. Ristivojević, M., Mitrović, R.: *Raspodela opterećenja – Zupčasti parovi i kotrljajni ležaji*, monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 2002
81. Mitrović, R., Ristivojević, M., Lazović, T.: *Influence of internal radial clearance on service life of deep groove ball bearing*, Proceedings of XVII International Conference on MATERIAL FLOW, MACHINES AND DEVICES IN INDUSTRY, Belgrade, 2002
82. Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M.: *Load distribution between rolling elements of ball and roller bearings*, Proceedings of 3rd International Conference Research and Development in Mechanical Industry – RaDMI '03, Herceg Novi, 2003
83. Lazovic, T., Ristivojevic, M., Mitrovic, R.: *Mathematical model of load distribution in rolling bearing*, FME Transactions, Vol.36, №4, 2008, 189-196
84. Lazovic, T., Mitrovic, R., Ristivojevic, M.: *Influence of internal radial clearance on the ball bearing service life*, Proceedings of the 3rd Int. Conference POWER TRANSMISSIONS 09, Kallithea – Chalkidiki, Greece, 2009, 441-444

85. Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M.: *Influence of internal radial clearance on the ball bearing service life*, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 16, №1, 2010, 1-8
86. Tomović, R.: *Calculation of the boundary values of rolling bearing deflection in relation to the number of active rolling elements*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 47, 2012, 74-88
87. Zaretsky, E.V.: *A.Palmgren Revisited – a Basis for Bearing Life Prediction*, Proceedings of STLE Annual Meeting, Kansas City, Missouri, 1997
88. Lieblein, J., Zelen, M.: *Statistical Investigation of the Fatigue Life of Deep-Groove Ball Bearings*, Journal of Research of National Bureau of Standards, Vol. 57, №5, 1956, 273- 316
89. Gabelli, A., Doyer, A., Morales-Espejel, G.: *The Modified Life Rating of Rolling Bearings: A Criterion for Gearbox Design and Reliability Optimization*, Power Transmission Engineering, 2015, 46-54
90. Weibull, W.: *The phenomenon of Rupture in Solids*, Ingeniörsvetenskapssakademiens Handlingar (Royal Swedish Institute for Engineering Research), Handlingar (Proceedings), №153, Generalstabens litografiska anstalts förlag, Stockholm, 1939
91. Zaretsky, E.V.: *2. Rolling bearing life prediction, theory, and application*, Recent Developments in Wear Prevention, Friction and Lubrication, 2010, 45-136
92. Thomas, H.R., Hoersch, V.A.: *Stresses due to the pressure of one elastic solid upon another with special reference to railroad wheels*, Bulletin 212, Engineering Experimental Station, University of Illinois, Urbana, USA, 1930
93. Zaretsky, E.V., Poplawski, J.V., Miller, C.R.: *Rolling Bearing Life Prediction – Past, Present, and Future*, Proceedings of International Tribology Conference, Nagasaki, Japan, 2000
94. Ioannides, E., Bergling, G., Gabelli, A.: *An analytical formulation for the life of rolling bearings*, Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series, 137, Finland, 1999
95. Zaretsky, E.V., Poplawski, J., Peters, S.: *Comparison of Life Theories for Rolling-Element Bearings*, NASA Technical Memorandum 106585, Annual Meeting, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Chicago, Illinois, USA, 1995
96. Zaretsky, E.V.: *Fatigue criterion to system design, life and reliability*, AIAA Journal of Propulsion and Power, 107(3), 1987, 76-83
97. Zaretsky, E.: *Rolling Bearing Life Prediction, Theory, and Application*, NASA/TP–2013-215305, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA, 2013

98. FAG Kugelfischer Georg Schäfer & Co.: *Kugellager – Rollenlager – Nadellager*, Publ.-Nr. 41600 DA, 1979
99. SKF: *Opšti katalog*, 3200 Y, 1984
100. Morales-Espejel, G., Gabelli, A., Ioannides, S.: *Lubrication and Contamination Effects on Bearing Life – part 2*, SKF Evolution magazine, №3, 2010, 25-30
101. Morales-Espejel, G., Gabelli, A., Ioannides, S.: *Lubrication and Contamination Effects on Bearing Life*, SKF Evolution magazine, №2, 2010, 25-31
102. Takemura, H., Matsumoto, Y., Murakami, Y.: *Development of New Life Equation for Ball and Roller Bearings*, Motion & Control, №11, NSK, 2001
103. Lazović, T.: *Radni vek kotrljajnih ležaja*, Zbornik predavanja, Akreditovani seminar za stručno usavršavanje nastavnika u srednjim školama za predmete Mašinski elementi, Konstruisanje i Ispitivanje mašinskih konstrukcija, Beograd, 2004, 43-50
104. Meyers, K.E.: *New Life Method for Rolling Bearings in Compressors*, Proceedings of International Compressor Engineering Conference, Purdue University, Indiana, USA, 1998
105. Jacobson, B.: *Lubrication selection and life calculation in refrigeration conditions*, Internal SF Interoffice Letter, 1996
106. Needelman, W.M., Zaretsky, E.V.: *Recalibrated Equation for Determining Effect of Oil Filtration on Rolling Bearing Life*, Power Transmissions Engineering, September 2015, 48-60
107. Balan, M.R., Tufescu, A., Cretu, S.S.: *A case study on relation between roughness, lubrication and fatigue life of rolling bearings*, 7th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering, Iasi, Romania, IOP Conf. Series: Materijals Science and Engineering, 147, 2016
108. Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., De Vries, A.J.C.: *A Model for Rolling Bearing Life with Surface and Subsurface Survival – Tribological Effects*, Tribology Transactions, 58, 2015, 894-906
109. Romanowicz, P.J., Szybiński, B.: *Fatigue Life Assessment of Rolling Bearings Made from AISI 52100 Bearing Steel*, Materials, 12, 371, 2019
110. Gupta, P.K., Zaretsky, E.V.: *New Stress-Based Fatigue Life Models for Ball and Roller Bearings*, Tribology Transactions, Vol.61, №2, 2018, 304-324
111. Gupta, P.K., Oswald, F.B., Zaretsky, E.V.: *Comparison of Models for Ball Bearing Dynamic Capacity and Life*, Tribology Transactions, 58, 2015, 1039-1053
112. Gupta, P.: *ADORE – Advanced Dynamic Of Rolling Elements*, User Manual, PKG – Pradeep K Gupta Inc, New York, USA, 2014

113. Londhe, N.D., Arakere, N.K., Haftka, R.T.: *Reevaluation of Rolling Element Bearing Load-Life Equation Based on Fatigue Endurance Data*, Tribology Transactions, 58, 2015, 815-828
114. Li Cui: *A new fatigue damage accumulation rating life model of ball bearings under vibration load*, Industrial Lubrication and Tribology, 72/10, 2020, 1205-1215
115. Kwofie, S., Rahbar, N.: *A fatigue driving stress approach to damage and life prediction under variable amplitude loading*, International Journal of Damage Mechanics, 22(3), 2012, 393-404
116. Oswald, F., Zaretsky, E., Poplawski, J.: *Effect of Internal Clearance on Load Distribution and Life of Radially Loaded Ball and Roller Bearings*,
117. Lazović, T., Simonović, I., Marinković, A.: *Service Life of Universally Loaded Deep Groove Ball Bearing Depending on Internal Clearance*, The 11th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering – KOD 2021, Novi Sad, Serbia, 2021, 20-21
118. Zaretsky, E.V., Poplawski, J.V., Root, L.E.: *Reexamination of Ball-Race Conformity Effects on Ball Bearing Life*, Technical Memorandum NASA TM-2007-212635, 2007
119. Zaretsky, E.V., Poplawski, J.V., Root, L.E.: *Relation between Hertz Stress-Life Exponent, Ball-Race Conformity, and Ball Bearing Life*, Technical Memorandum NASA TM-2008-214265, 2008
120. Oswald, F.B., Zaretsky, E.V.: *Interference-Fit Life Factors for Ball Bearings*, Technical Memorandum NASA TM-2010-216913, 2010