

# Motorvreteno

---

Pacadi, Jurica

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:651430>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Jurica Pacadi**

Zagreb, 2011. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# MOTORVRETENO

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar

Student:

Jurica Pacadi

Zagreb, 2011. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru Damiru Ciglar na potrebnoj literaturi, te uputama i savjetima tokom izrade ovog završnog rada.

Jurica Pacadi



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne  
simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
SAŽETAK.....	V
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest VBO strategije.....	2
1.2. Visokobrzinska obrada.....	3
2. MOTORVRETENO .....	4
2.1. Uvod.....	4
2.2. Povijesni pregled.....	4
2.3. Glavne postavke.....	5
2.4. Stanje u gradnji motorvretena .....	7
2.5. Aktualna područja razvoja u industriji.....	7
2.6. Područja primjene i specifični zahtjevi.....	8
3. ANALIZA VRETENA.....	10
3.1. Eksperimentalno modeliranje .....	11
3.2. Teoretsko modeliranje.....	11
3.3. Modeliranje ležajeva s kosim dodirom .....	12
3.4. Izvori topline u motorvretenima .....	13
4. MEHANIČKI DIZAJN MOTORVRETENA .....	14
4.1. Ležajevi.....	14
4.1.1. Kotrljajući kuglični ležajevi.....	15
4.1.2. Kotrljajući valjkasti ležajevi .....	18
4.1.3. Magnetski ležajevi .....	20
4.1.4. Hidrostatski i hidrodinamski ležajevi .....	21
4.1.5. Zračni ležajevi.....	21
4.1.6. Podmazivanje ležajeva.....	22
4.2. Hlađenje .....	24
4.2.1. Hlađenje motora.....	24
4.2.2. Hlađenje ležajeva .....	25
4.2.3. Hlađenje glavnog vretena.....	25
4.3. Unutarnja dobava rashladnog sredstva .....	26
4.4. Stezanje alata i mehanizmi otpuštanja .....	27

4.5. Sučelja.....	28
4.5.1. Sučelje vreteno/alat.....	28
4.5.2. Strmi konus, SK konus .....	28
4.5.3. HSK držači alata .....	29
4.5.4. Sandvik „Coromant Capto“ .....	30
4.5.5. Sučelje vreteno/alatni stoj .....	31
5. POGONSKI KONCEPTI .....	33
5.1. Dizajn motora.....	33
5.2. Pretvarač frekvencije.....	34
6. INTEGRACIJA SENZORA I PRAĆENJE STANJA.....	36
6.1. Otkrivanje vibracija/ podrhtavanja.....	36
6.1.1. Otkrivanje podrhtavanja tijekom procesa glodanja .....	36
6.1.2. Dinamometri .....	36
6.1.3. Akcelerometri .....	37
6.1.4. Mjerači pomicanja .....	37
6.2. Otkrivanje podrhtavanja u procesu brušenja.....	38
6.3. Preventivno otkrivanje oštećenja ležaja .....	39
6.4. Sudari i lom alata .....	42
6.5. Aksijalni pomak .....	43
7. MEHATRONIČKI KONCEPTI.....	45
7.1. Aktivno balansiranje .....	45
7.2. Aktivna kontrola predopterećenja.....	47
7.3. Aktivna kompenzacija otklona alata .....	48
7.4. Kontrola prigušenja vibracija/podrhtavanja.....	48
7.4.1. Aktivna kompenzacija .....	49
7.4.2. Poluaktivna kompenzacija .....	50
7.4.3. Pasivna kompenzacija .....	51
8. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	53

## POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Prikaz promjene temperature u odnosu na brzinu rezanja [1] .....	2
Slika 2.1.	Povijesni pregled [2] .....	5
Slika 2.2.	Presjek motorvretena [3].....	6
Slika 2.3.	Sustavi vretena i njihova integracija u sustav [2] .....	6
Slika 2.4.	Vretena dostupna na tržištu [2] .....	7
Slika 2.5.	Glavni trendovi u industriji - razvoj vretena [2] .....	8
Slika 2.6.	Područja primjene motorvretena [2] .....	9
Slika 3.1.	Dijagram toka analize vretena [2].....	10
Slika 3.2.	Geometrija kugličnog ležaja s kosim dodirom [2].....	12
Slika 4.1.	Usporedba svojstava sustava uležištenja motorvretena [2].....	15
Slika 4.2.	Novi kinematički koncepti za kuglične ležajeve vretena [2] .....	16
Slika 4.3.	Dvostruki kuglični ležaj s kosim dodirom [4] .....	17
Slika 4.4.	Dvostruki kotrljajući valjkasti ležaj [5] .....	18
Slika 4.5.	Konstruktivna rješenja ležajeva u svrhu smanjenje trenja [2] .....	19
Slika 4.6.	Magnetski ležaj [5] .....	20
Slika 4.7.	Prikaz sustava podmazivanja ulje - zrak za motorvretena [2] .....	22
Slika 4.8.	Sustavi podmazivanje ležajeva [2].....	23
Slika 4.9.	Hlađenje motora i ležajeva [2] .....	24
Slika 4.10.	Hlađenje glavnog vretena[2] .....	25
Slika 4.11.	Dijagram zagrijavanja vretena [6] .....	26
Slika 4.12.	Izbjegavanje razdvajanja aerosola [7].....	27
Slika 4.13.	„Big-Plus“ konus i njegove prednosti [2] .....	28
Slika 4.14.	HSK držači alata [8].....	29
Slika 4.15.	Sučelje vretena temeljeno na principu modularne gradnje [2] .....	31
Slika 4.16.	Modul motorvretena s dvostrukim ekscentričnim jedinkama [2] .....	32
Slika 5.1.	Motorvreteno s pomoćnim pogonom [2] .....	33
Slika 5.2.	Shema, naponi i struje dvorazinskog(gore) i trirazinskog(dolje) pretvarača [2]	34
Slika 5.3.	Stacionarne temperature motora i prednjeg ležaja s tri različita pretvarača frekvencije [2].....	35
Slika 6.1.	Senzorski koncepti za akustičnu emisiju [2].....	38
Slika 6.2.	Signal ubrzanja (R-amplituda, L-vrijeme trajanja, P-vremenski period) [2].....	39
Slika 6.3.	Shema ispitnog uređaja ležajeva [2] .....	40
Slika 6.4.	Mjerni prsten s piezoelektričnim sensorima sile [2].....	40



Slika 6.5.	„Intelligent Spindle Unit“ s primjerom senzora i aktuatora [2] .....	41
Slika 6.6.	Instalacija mjernog prstena unutar vretena [2].....	42
Slika 6.7.	Tri metode kompenzacije aksijalnog pomaka vretena [2] .....	43
Slika 6.8.	Postolje za testiranje i utvrđivanje toplinskog modela [2].....	44
Slika 7.1.	Gore: Načelo rotorskog mehanizma za aktivno balansiranje; Dolje: Shematski prikaz uređaja aktivnog balansiranja [2].....	45
Slika 7.2.	Gore: Sustav dvostruke ravnine balansiranja (a: balansirajući prsten na vretenu; b: senzori na statoru); Dolje: Shematski prikaz (a: balansirajući prsten; b: stator sa sensorima za brzinu i položaj; c i d: senzori vibracije) [2] .....	46
Slika 7.3.	Brzina ovisna o sili preopterećenja bez i sa aktivnom kontrolom preopterećenja [2] .....	48
Slika 7.4.	Aktivna kompenzacija otklona alata; Gore: Prototip; Dolje: Otklon alata [2] ...	49
Slika 7.5.	CAD model i prototip aktivnog vretena za glodanje s piezosnopovima [2].....	50
Slika 7.6.	Shema amortizera s ER tekućinom [2] .....	51

## **SAŽETAK**

U radu je prikazano stanje u tehnologiji u pogledu jednog od važnih modula alatnih strojeva-glavne vretene jedinice, s naglaskom na motorizirane vretene jedinice za velike brzine i visoke performanse rezanja. Dane su informacije o glavnim komponentama vretenih jedinica u vezi povijesnog razvoja, građe motorvretena, trenutnog stanja u tehnici, području primjene te području razvoja. U trećem poglavlju spomenute su teoretske i matematičke metode modeliranja, izvori topline u vretenima i ležajevima, te je dan osvrt na modeliranje kugličnog ležaja s kosim dodirom, koji je najviše u primjeni kod uležištenja glavnog vretena. Nadalje, prikazani su sustavi ležajeva koji su zastupljeni u primjeni kod motorvretena, te neka razvijena i poboljšana konstrukcijska rješenja kugličnih i valjnih ležajeva, s ciljem povećanja krutosti i vijeka trajanja. Obradeno je hlađenje motora, ležajeva i osovine, te je dan prikaz sustava koji se koriste za prihvat reznoga alata. Predstavljeni su pojmovi integracije senzora i aktuatora (praćenje procesa obrade, izmjene alata, hlađenja i podmazivanja, otkrivanje vibracija i podrhtavanja, mjerenje sila i pomaka) s ciljem povećanja produktivnosti, pouzdanosti i sigurnosti procesa obrade.

## 1. UVOD

Sposobnost da se komponente strojno obrađuju u najkraćem mogućem vremenu je pitanje koje je u današnje vrijeme od velike važnosti. Zbog toga se prilikom izrade alata za obradu lima, alata za tlačno lijevanje i slično, bilo koje poboljšanje ili metoda koja će omogućiti brže isporuke, a istovremeno i povećavati kvalitetu izrade, mora uzeti itekako u obzir. Jedan od načina je korištenje strategije visokobrzinske obrade - VBO ili često korišteni engleski naziv High Speed Machining - HSM. Inače, ne postoji jednoznačna definicija kako bi se točno mogla opisati strategija VBO u strojnoj obradi, ali to može biti bilo koji proces na NU glodalici kod kojeg se koristi veća učestalost vrtnje vretena, veći posmak, i bolja tehnologija obrade, a sve u svrhu povećane produktivnosti i brže proizvodnje od one koja se može postići konvencionalnim ili prethodno razvijenim procesima obrade. Moderna tehnologija u procesima obrade koja se razvila u današnje vrijeme omogućila je operaterima na strojevima da pristupe svojem poslu na jedan potpuno drugačiji način. Specijalni rezni alati razvijeni za VBO strategiju imaju potpuno drugačije rezne karakteristike od dosadašnjih reznih alata. Dok se kod tradicionalne metoda programiranja uglavnom gleda da alat reže odozgo prema dolje, kod moderne visokobrzinske obrade može se dogoditi i da alat reže odozdo prema gore.

Kod VBO strategije koriste se razne poboljšane tehnologije obrade kao što su :

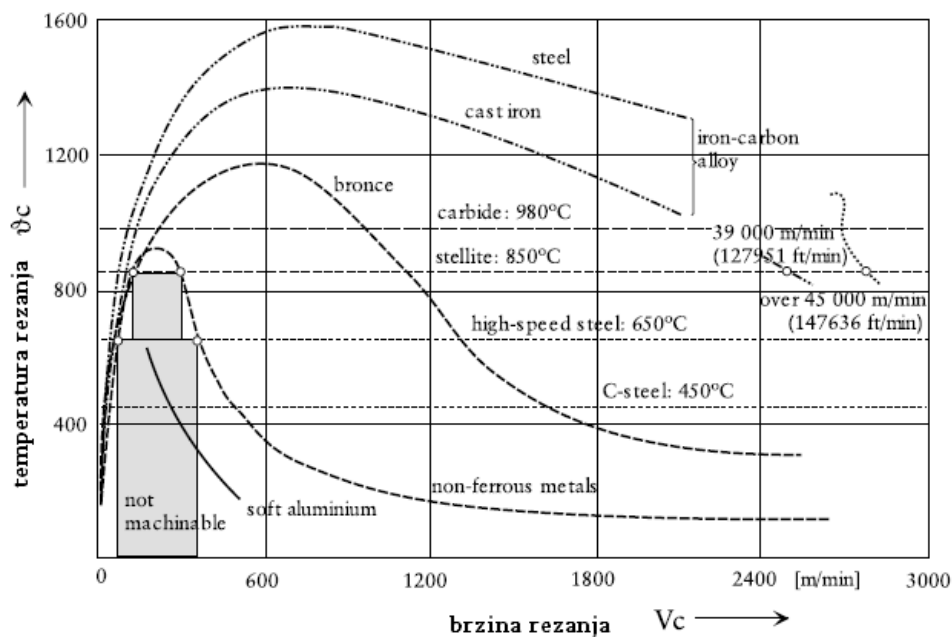
- mala dubina rezanja
- veliki posmak ( do 25,4 m/min)
- velike učestalosti vrtnje (veće od 12000 min<sup>-1</sup>)
- mogućnosti upravljačke jedinice „gledanje unaprijed“ - utvrđivanje najbržeg posmaka, tako da uklopi jedan blok programa u drugi i smanji vrijeme potrebno za obradu

Kod VB obrade, glavno vreteno je najvažniji dio alatnog stroja i o njemu ovisi kakva će biti obrada, a najkritičniji su dijelovi ležajevi. To se mora itekako uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja i konstruiranja glavnog vretena, jer ono mora biti konstruirano tako da podnosi velike frekvencije okretanja, a istovremeno prenosi i dovoljno veliku snagu i moment, uz ne preveliko opterećenje i čim duži životni vijek. Ležajevi koji se mogu koristiti kod alatnih strojeva koji su dizajnirani za VB obradu su kotrljajući kuglični, kotrljajući valjkasti, hidrostatski ili magnetski ležajevi, a najpopularnije rješenje za takva vretena su kotrljajući kuglični ležajevi s kosim dodirom.

Veliku ulogu također ima i prihvat reznog alata u glavno vreteno. Kod VB obrade najpopularniji držač reznog alata je HSK (hollowshank taper), konusni prihvat alata koji se odlikuje preciznošću svojstvenoj za konusne, te krutošću koja karakterizira priрубnicu.

### 1.1. Povijest VBO strategije

Strategija VBO je našla svoju primjenu u raznim granama industrije. Visokobrzinska obrada je jedna od naprednih proizvodnih tehnologija s velikim potencijalom u budućnosti. U ovom konkretnom slučaju, razdoblje razvoja od približno 60 godina bilo je ne samo zbog opreznog stava industrije, već i zbog činjenice da postojeći proizvodni pogoni, koji su odgovarali stanju tehnike u to vrijeme, nisu bili u stanju ispuniti zahtjeve VBO. Teorijska razmatranja sežu još u daleku 1931. godinu, kad se na temelju prijašnjih istraživanja došlo do vrlo važnog zaključka da temperatura rezanja nakon neke određene brzine rezanja počinje padati. To je prikazano za različite materijale na slici 1.1.



Slika 1.1. Prikaz promjene temperature u odnosu na brzinu rezanja [1]

U ranim 50-ima, opet se počelo javljati zanimanje za alatne strojeve koji će moći raditi s visokim brzinama rezanja. S obzirom na to da strojevi s povećanim brzinama rotacije nisu bili dostupni, počela su balistička istraživanja. Bila su izvedena ili prolaskom alata preko uzorka izratka pomoću raketa ili lansiranje projektila u obliku epruvete obratka uz stacionarnu

oštricu. Iz ovih testova dobivene su spoznaje da su kod visokih brzina rezanja stvoreni uvjeti rezanja bitno drugačiji nego kao kod konvencionalnih metoda rezanja. Različite američke studije napravljene u ranim 60-ima pokazale su da se produktivnost povećava dramatično i može se očekivati smanjenje troškova proizvodnje i obrade proizvoda ako se može prevladati teško trošenje stroja, alata i velike vibracije. U istraživačkom projektu 1978. utvrđeno je da se brzinama rezanja iznad 6500m/min otvaraju novi zanimljivi aspekti za obradu aluminija. 1977.godine prilikom jednog balističkog testa utvrđeno je da je kvaliteta obrađene površine značajno poboljšana s povećanjem brzine rezanja. Tek 80-ih godina prošlog stoljeća ta teorijska razmatranja imala su priliku zaživjeti i u stvarnosti, jer su tada izrađeni prvi strojevi koji su mogli zadovoljiti zahtjeve VBO, i od tada je VBO strategija u stalnom usponu. Proces razvoja VBO uključivao je ne samo razvoj strojeva, već također i daljni razvoj alata i materijala za obradu, a također i razvoj CAD/CAM sustava[1].

## 1.2. Visokobrzinska obrada

Istraživanja utjecaja brzine rezanja na efekte procesa obrade metala rezanjem su pokazala da sa povećanjem brzine rezanja dolazi do značajnog smanjenja otpora rezanja i temperature predmeta obrade i alata. Naime, i do 98 % generirane količine topline se odvodi odvojenom česticom, tako da su i predmet obrade i alat skoro potpuno hladni. Istovremeno se značajno poboljšava kvaliteta obrađene površine (izuzetno sjajna površina) i točnost obrade, jer se obrada odvija izvan područja pojave vibracija.

Visokobrzinska obrada zahtjeva razvoj odgovarajućih alatnih strojeva i reznih alata. Riječ je o alatnim strojevima visoke krutosti i stabilnosti, kod kojih se posebna pažnja posvećuje podsustavima vreteništa (glavno gibanje sa vrlo velikim brojem okretaja i do 100 000 min<sup>-1</sup>), pogona radnog stola (sustav pomoćnog gibanja), upravljačke jedinice, sustav zaštite i sl.

Kod reznih alata osnovni zahtjevi su u pogledu konstrukcije (velika krutost, malo radijalno bacanje, maksimalna uravnoteženost ...), postavljanja i stezanja (točno pozicioniranje i ponovljivost položaja, laka i brza izmjena alata ... ) i materijala i geometrije alata (tvrđi metali, rezna keramika, bornitrid ili polikristalni dijamant, optimalna geometrija, najčešće pozitivan prednji kut, velika vrijednost stražnjeg kuta itd.).

Zavisno od vrijednosti brzine rezanja visokobrzinski postupci obrade se dijele na postupke sa:

- visokim brzinama rezanja (600 – 1 800 m/min),
- vrlo visokim brzinama rezanja (1 800 – 18 000 m/min) i
- ultravisokim brzinama rezanja (preko 18 000 m/min).

## 2. MOTORVRETENO

### 2.1. Uvod

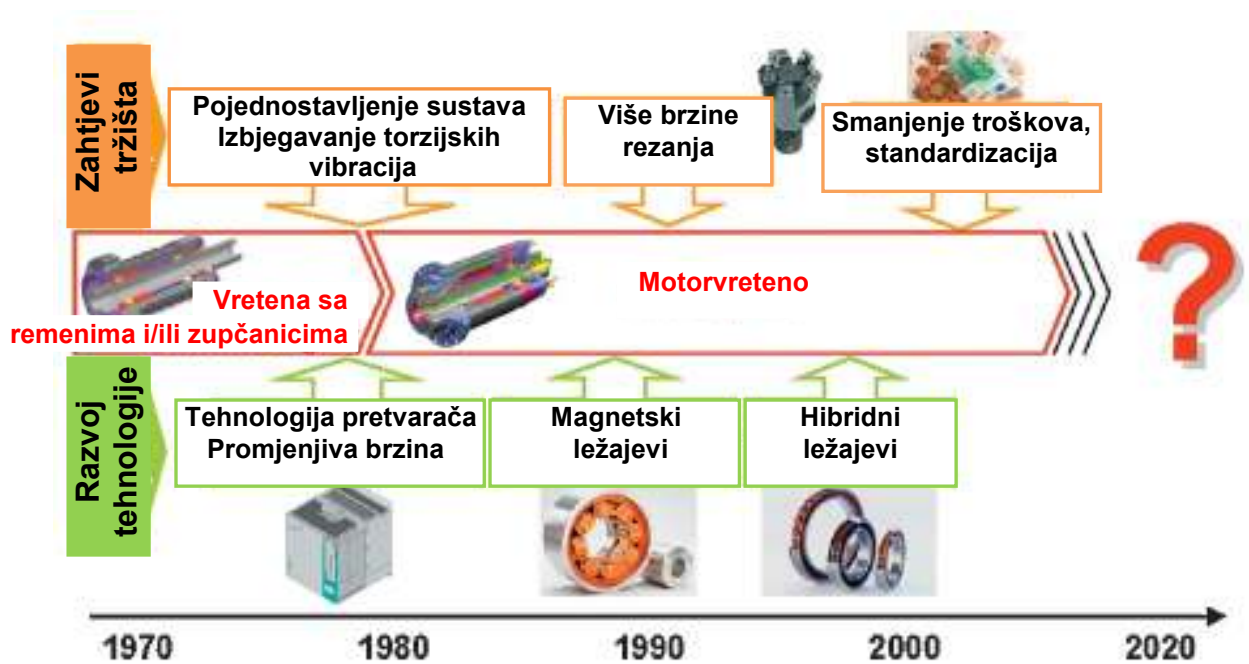
Glavna vretena alatnih strojeva u osnovi moraju ispuniti dva zadatka:

- precizno rotirati alat (bušenje, glodanje i brušenje) ili radni komad (tokarenje) u radnom prostoru
- prenositi potrebnu energiju za uklanjanje materijala u zonu rezanja

Glavna vretena očito imaju veliki utjecaj na kvalitetu obrađenih dijelova ali također i na samu cijenu obrade. Ovaj rad daje pregled sadašnjeg stanja i predstavlja istraživačke izazove u području tehnologije gradnje glavnih vretena i motorvretena alatnih strojeva.

### 2.2. Povijesni pregled

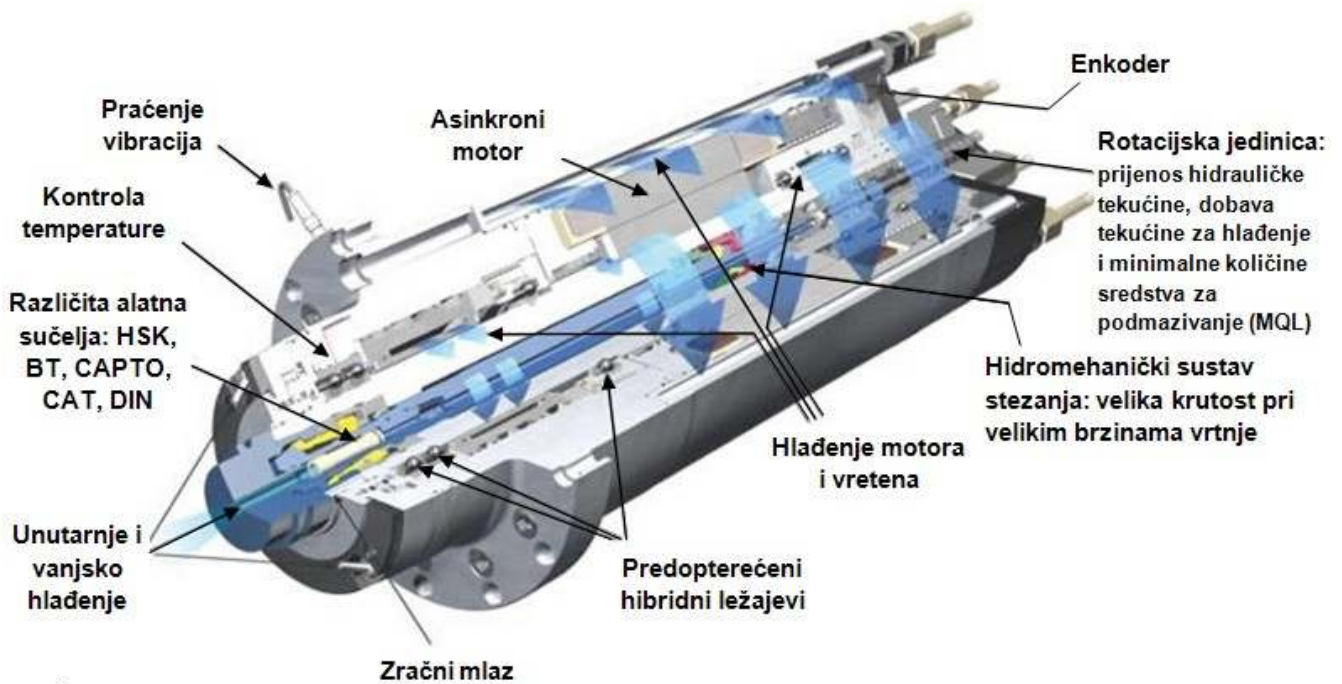
Klasična glavna vretena alatnih strojeva su bila vođena remenima ili zupčanicima, a brzina rotacije mogla se mijenjati samo promjenom prijenosnog omjera ili brojem pogonskih polova pomoću električnih sklopki. Kasnije su razvijeni jednostavni električni ili hidraulični kontroleri te se brzina vrtnje vretena mogla mijenjati pomoću beskonačno podesivih rotirajućih transformatora. Potreba za povećanjem produktivnosti dovodi do zahtjeva za veće brzine obrade, što dalje dovodi do razvoja novih ležajeva, snažnije elektronike i sustava pretvarača. Napredak u području elektronike (statičkog pretvarača frekvencije) doveo je do razvoja kompaktnih pogona s niskom cijenom održavanja koristeći visokofrekventne trofazne asinkrone motore. Kroz rane 1980-te visoke brzine vretena su bile ostvarive samo korištenjem aktivnih magnetskih ležajeva. Kontinuirani razvoj ležajeva, podmazivanja, materijala kotrljajućih elemenata i pogonskih sustava (motora i pretvarača) omogućili su izgradnju direktnih pogonskih motorvretena koji trenutno ispunjavaju širok spektar zahtjeva. Povijesni pregled tehnologije vretena prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1. Povijesni pregled [2]

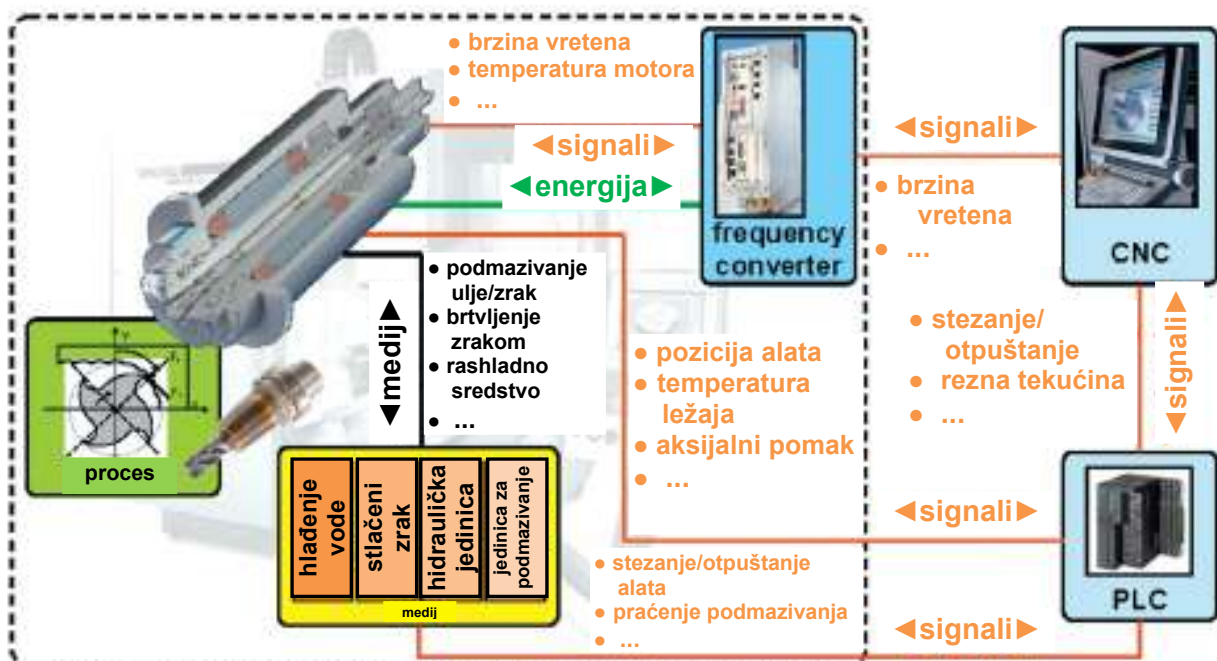
### 2.3. Glavne postavke

Danas je velika većina suvremenih alatnih strojeva opremljena sa motorvretenima. Za razliku od eksterno upravljanih vretena, motorizirana vretena ne zahtijevaju mehaničke prijenosne elemente kao što su zupčanici i spojke. Motorvretena se uglavnom sastoje od elemenata prikazanih na slici 2.2. Vretena imaju najmanje dva seta uglavnom sustava kugličnih ležajeva. Nosivi sustav, sustav ležajeva, je komponenta sa najvećim utjecajem na vijek trajanja vretena. Motor je najčešće smješten između dva sustava ležaja. Zbog visokog omjera snaga-volumen, često je potrebno aktivno hlađenje, koje se najčešće provodi kao vodeno hlađenje. Rashladno sredstvo protječe kroz rashladni rukav oko statora motora, a često i vanjskih prstenova ležajeva. Brtve na alatu na kraju vretena sprječavaju prodor nečistoća i rezne tekućine. Standardizirano sučelje alata kao što je HSK i SK nalazi se na prednjem kraju vretena. Sustav stezanja se koristi za brzu automatsku izmjenu alata. Ako se rezna tekućina mora prenositi kroz alat za rezanje do oštrice, prikladni kanali i rotacijske jedinice postaju potrebne značajke sustava stezanja.



Slika 2.2. Presjek motorvretena [3]

Danas je gotovo svako vreteno opremljeno sa sensorima za praćenje temperature motora (termistora ili termoparova) i položaja steznog sustava. Mogu se priključiti dodatni senzori za praćenje ležajeva, pogona i procesa stabilnosti, ali nisu uobičajeni u brojnim industrijskim aplikacijama. Granice sustava, koji je tema ovog rada, prikazane su slikom 2.3.

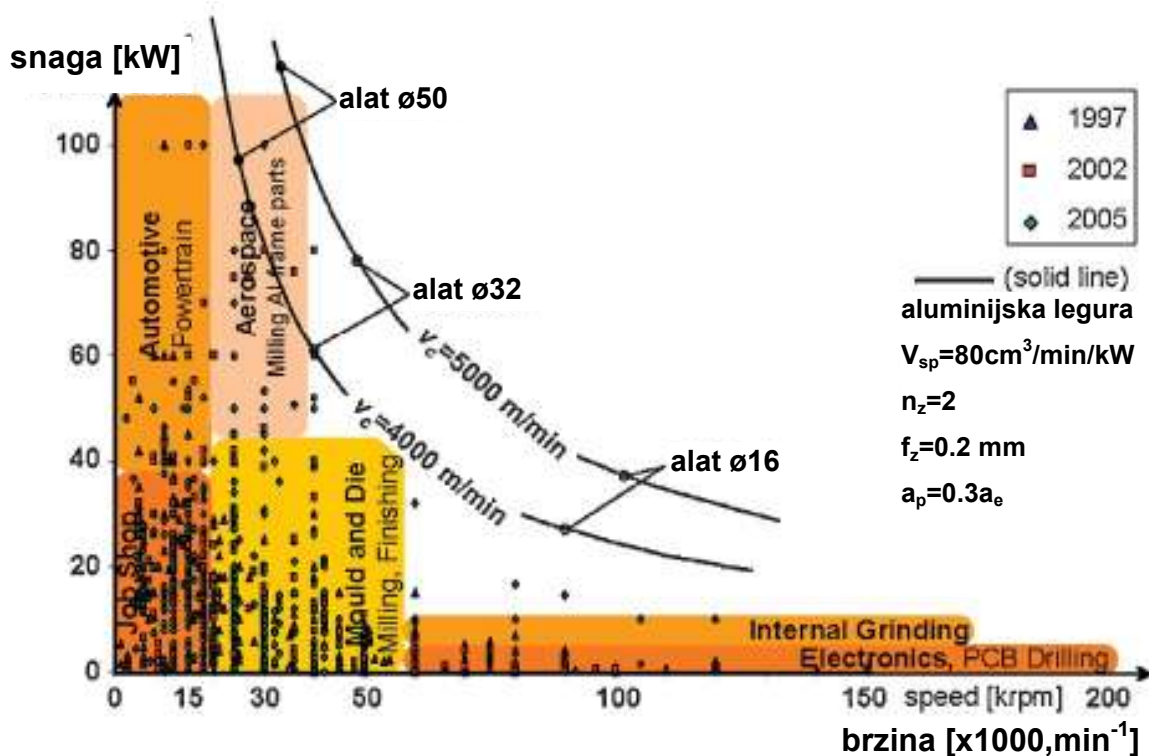


Slika 2.3. Sustavi vretena i njihova integracija u sustav [2]



## 2.4. Stanje u gradnji motorvretena

Trenutni proizvođači motorvretena nude široku paletu rješenja za područja u kojima se primjenjuju, prikazano na slici 2.4. Motorvretena visoke snage i brzine su uglavnom razvijena za obradu velikih aluminijskih okvira u zrakoplovnoj industriji. Vretena s ekstremno visokim brzinama i malim snagama se koriste u elektroničkoj industriji za bušenje tiskanih pločica ili kod unutarnjeg brušenja.



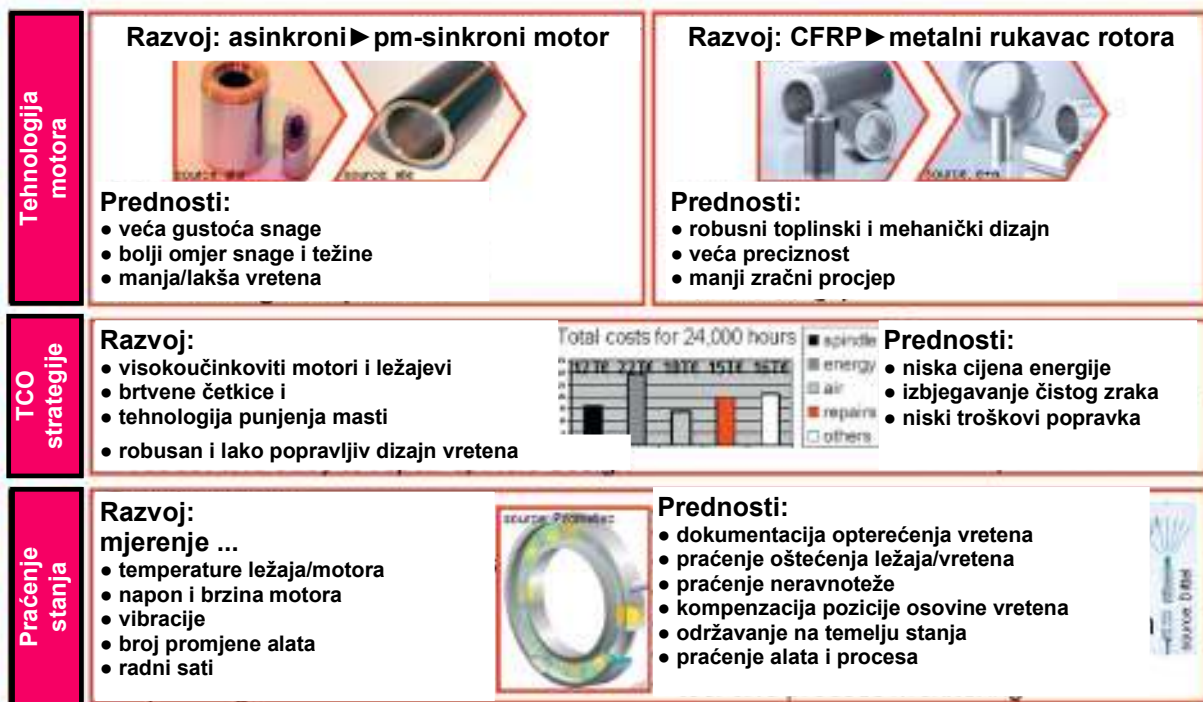
Slika 2.4. Vretena dostupna na tržištu [2]

## 2.5. Aktualna područja razvoja u industriji

Trenutni razvoj motorvretena za industrijsku primjenu usredotočen je na tehnologiju motora, poboljšanje ukupnih troškova vlasništva i praćenje stanja za predviđanje održavanja, slika 2.5. Drugo središnje pitanje je razvoj pogonskog sustava koji neutralizira postojeće ograničenje snage i izlazne frekvencije, dok smanjuje zagrijavanja osovine vretena. Posebna pozornost posvećena je povećanju pouzdanih dostignutih broja okretaja u prošlosti. Međutim, cilj je povećati okretni moment pri brzinama većim od  $15\,000 \text{ min}^{-1}$ .

Zbog povećanih zahtjeva na pouzdanost, životni ciklus i predviđanje održavanja, sustav praćenja tehničkog stanja motorvretena je postao još važniji. Periodično i / ili kontinuirano praćenje parametara stanja vretena omogućuje otkrivanje trošenja, pregrijavanja i predstojećih

kvarova. Razumijevanje troškova vijeka trajanja vretena steklo je stalni značaj u predviđanju perioda servisa s održavanjem, kvara i operativnih troškova.



Slika 2.5. Glavni trendovi u industriji - razvoj vretena [2]

## 2.6. Područja primjene i specifični zahtjevi

Motorvretena su razvijena i proizvedena za primjenu kod širokog raspona alatnih strojeva sa zajedničkim ciljem maksimiziranja odstranjivanja metala i točnosti obrađenog dijela. Slika 2.6. daje prikaz u pogledu područja primjene, razreda materijala i rezultirajuće zahtjeve glede broja okretaja, snage, momenta i točnosti. Radni materijali rangirani su u rasponu od lako obradljivih materijala kao što su aluminij, pri velikim brzinama uz velike snage vretena, do nikla i legura titana koji zahtijevaju visoki okretni moment i krutost vretena pri niskim brzinama. Rezanje materijala koji sadrže abrazivni ugljik ili vlaknima ojačane plastike (FRP – Fibre-reinforced plastic) zahtijeva dobro brtvljenje na prednjem kraju vretena. Vretena za bušenje tiskanih pločica rade pri rasponu brzina od 100 000 do 300 000  $\text{min}^{-1}$ .

Povećanje produktivnost i brzine u tom području primjene tijekom posljednjih nekoliko godina je bilo moguće s razvojem preciznih zračnih ležajeva. Današnja vretena dopuštaju stopu skidanja materijala (material removal rate - MRR) više od 10 litara aluminija u minuti.

Zahtjevi Područja	Materijal	Brzina	Snaga	Moment	Točnost
Job Shop	razni	☉	☉	☉	☉
Kalupi	Čelik	☉	☉	☉	●
	Al legure	●	☉	☉	●
Zrakoplovstvo	Al legure	☉	●	☉	☉
	Ti legure	○	☉	●	☉
	FRP	●	☉	☉	☉
Automobilska industrija	Al lijev	☉	☉	☉	☉
	Fe lijev	☉	☉	☉	☉
Elektronika	FRP*	●	☉	☉	●

○

Vrlo nisko

☉

Nisko

☉

Srednje

☉

Visoko

●

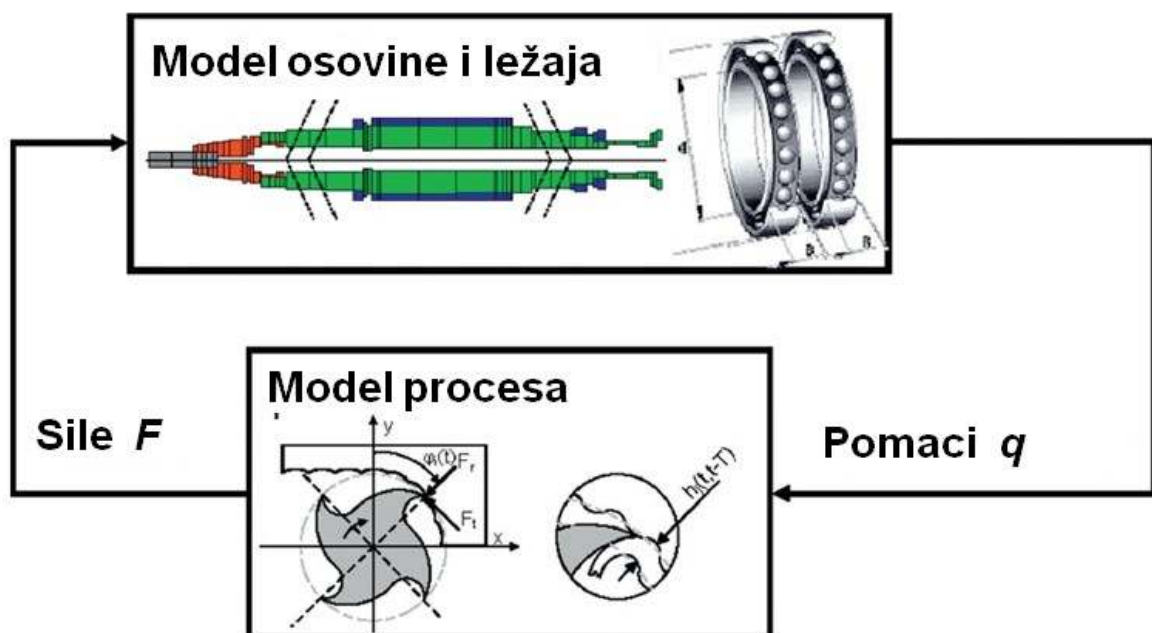
Vrlo visoko

Slika 2.6. Područja primjene motorvretena [2]

Brušenje je završna operacija gdje se potrebna visoka točnost, što zahtijeva krutost vretena s ležajevima uz minimalna odstupanja. Današnja vretena za unutarnje okruglo brušenje zahtijevaju odstupanje od centričnosti manje od 1 $\mu$ m. Vretene jedinice koje se koriste uglavnom za operacije bušenja i obrade provrta zahtijevaju visoku aksijalnu krutosti, što se postiže korištenjem ležajeva s kosim dodirom sa visokim kontaktnim kutevima. Naprotiv, kod operacija visokobrzinskog glodanja koriste se vretena s ležajevima koji imaju mali kontaktni kut kako bi se smanjila ovisnost radijalne krutosti o centrifugalnim silama. Suvremeni obradni centri imaju tendenciju ka multifunkcionalnosti, gdje se na istom komadu mogu izvršiti operacije glodanja, bušenja, brušenja i ponekad honanja s istim stupanjem izvedbe. Osjetljiva točka kod unapređenja višenamjenskih alatnih strojeva je još uvijek glavo vreteno, koje ne može zadovoljiti sve operacije obrade s istim stupanjem izvedbe. Rekonfigurabilni i modularno građeni alatni strojevi zahtijevaju izmjenjiva vretena sa standardiziranim mehaničkim, hidrauličkim, pneumatskim i električnim sučeljima.

### 3. ANALIZA VRETENA

Cilj modeliranja i analize vretene jedinice je simulacija izvedbe i optimizacija dimenzija vretena u fazi projektiranja kako bi se postigla maksimalna dinamička krutost i povećao stupanj skidanja materijala s minimalnim dimenzijama i potrošnjom energije. Mehanički dio sklopa motorvretena sastoji se od šuplje vretene osovine koja je montirana u kućište s ležajevima. Kod visokobrzinskih vretena se najčešće koriste kuglični ležajevi sa kosim dodirom zbog svojstava niskog trenja i sposobnosti da podnesu vanjska opterećenja u radijalnom i oba aksijalna smjera. Krutost ležaja je modelirana kao funkcija kontaktnog kuta kugličnog ležaja, preopterećenja uzrokovanog vanjskim opterećenjem ili toplinskog širenja vretena tijekom rada. Ako krutost ležaja ovisi o brzini ili ako vretena treba simulirani pod opterećenjima kod rezanja, koriste se numeričke metode za predviđanje vibracija duž vretene osi, kao i opterećenja na kontaktima ležajeva. Model omogućuje simulaciju interakcije između procesa rezanja i strukture vretena, slika 3.1.



Slika 3.1. Dijagram toka analize vretena [2]

Simulacijski modeli omogućuju optimizaciju parametara dizajna vretena, bilo da bi se postigla maksimalna dinamička krutost pri svim brzinama kod općih operacija obrade, ili da se ostvari maksimalna aksijalna dubina rezanja na određenoj brzini s određenim alatom za određenu operaciju obrade. Cilj ostvarivanja maksimalne količine rezanja materijala pri željenoj brzini bez oštećenja ležajeva i osovine je glavni cilj dizajna vretena uz zadržavanje svih drugih kvaliteta, npr. točnosti i pouzdanosti.

### 3.1. Eksperimentalno modeliranje

Dinamičko ponašanje postojećih vretena je najbrže dobiveno mjerenjem njegove funkcije frekvencijskog odziva (frequency response function - FRF) između sile i pomaka na vrhu alata. Eksperimentalno mjerenje FRF-a je praktično za procijenu dinamičke krutosti i identifikaciju podrhtavanja bez uvjeta rezanja, u procesu planiranja strojne obrade dijela. Međutim, sljedeće teškoće treba imati na umu:

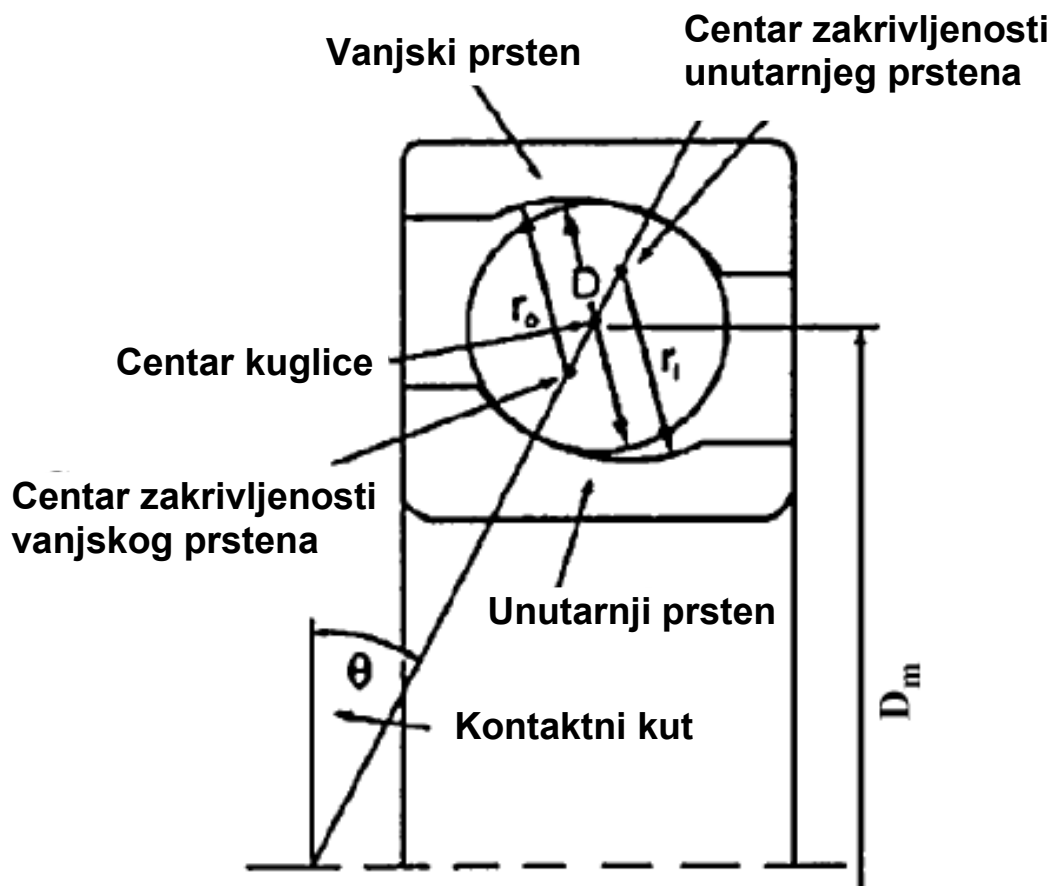
- samo mali dio rotirajuće osovine je dostupan za testiranje, stoga modeliranje cijelog vretena nije moguće
- operativne brzine i temperature uglavnom utječu na svojstvene vrijednosti
- metode za izdvajanje parametara iz mjerenih ulaznih i izlaznih podataka ne dovode uvijek do točne identifikacije dinamičkih parametara vretena.

### 3.2. Teoretsko modeliranje

Teorijski modeli temelje se na fizikalnim zakonima i koriste se za predviđanje i poboljšanje performansi vretena tijekom faze dizajna. Modeli pružaju matematički odnos između ulaza  $F$  - sila, brzina i izlaza  $q$  - progibi, opterećenja ležajeva i temperature. Matematički modeli mogu biti izraženi u oblicima prostornog stanja ili skupom običnih diferencijalnih jednadžbi. U oba se slučaja mogu modelirati linearna i nelinearna ponašanja vretena.

### 3.3. Modeliranje ležajeva s kosim dodirom

Kuglični ležajevi s kosim dodirom, slika 3.2., se najčešće koriste kod visokobrzinskih vretena. Ležajevi zahtijevaju predopterećenje kako bi se spriječilo klizanje u cilju održavanja rotacijske točnosti i dovoljne krutosti u radijalnom i aksijalnom smjeru. U osnovi, postoje dvije vrste predopterećenja ležajeva: kruto predopterećenje i stalno predopterećenje. Modeliranje oslonca ležaja osovine vretena važno je u predviđanju strukturne deformacije glavnog vretena tijekom obrade. Parametri ležaja mogu varirati tijekom rada, što utječe na krutost. Na primjer, tijekom rezanja mogu varirati: relativni pomak centara zakrivljenosti valjne staze, relativna brzina između unutarnjeg i vanjskog prstena, aksijalna i radijalna opterećenja, temperaturna razlika između unutarnjih i vanjskih prstenova te kutevi kontakta.



Slika 3.2. Geometrija kugličnog ležaja s kosim dodirom [2]

Modeli ležajeva razmatraju sljedeće uvjete:

- relativna brzina između unutarnjeg i vanjskog prstena
- centrifugalne sile, koje se odnose na brzinu, djeluju na valjne elemente
- relativni pomak od središta zakrivljenosti utora prstena zbog toplinskog širenja

Dobivena krutost ležaja ovisi o veličini kuglica ili valjaka ležaja, zakrivljenosti ležajnih prstenova i kutu kontakta. Međutim, dinamika ležaja se mijenja s preopterećenjem, silama rezanja, brzinom vretena i toplinskim širenjem. Ti čimbenici dovode do nelinearnog modeliranja sustava vretena.

### 3.4. Izvori topline u motorvretenima

U osnovi postoje ovi izvori topline u motorvretenima:

- trenje unutar ležajeva
- gubici snage motora - ovisno o tipu motora i pretvaraču frekvencije
- rezna snaga - pošto se većina topline prenosi na odvojenu česticu, ne igra važnu ulogu
- trenje u uređaju za stezanje alata

Veliki je izazov predvidjeti količinu generirane topline u ležaju. Kod toga se razlikuju tri glavna izvora trenja u kontaktima kuglica i utora ležaja:

- trenje opterećenja uzrokovano valjanjem i kontaktnim silama
- viskozno trenje uzrokovano viskoznošću maziva
- trenje vrtnje uzrokovano kinematikom valjnih elemenata

Trenutno ni jedna od teoretskih analiza nije s dovoljnom točnošću predvidjela raspodjelu temperature i rezultirajuće toplinske deformacije ležajeva vretena. Generalizirani modeli primjenjivi za širok raspon ležajeva, maziva i radnih uvjeta, još uvijek nisu razvijeni.

## 4. MEHANIČKI DIZAJN MOTORVRETENA

Ovisno o području primjene alatnih strojeva, sustavi uležištenja motorvretena su predmet složenog niza zahtjeva. Na primjer, kod visokobrzinske obrade aluminijskih komponenata postoji potreba da se kombiniraju visoke brzine rotacije s niskom krutošću, dok se kod teških uvjeta obrade, titan ili nikal legura, zahtijeva da ležajevi motorvretena budu u stanju apsorbirati velike sile rezanja pri niskim brzinama vrtnje. Osim izbora odgovarajućeg tipa uležištenja, optimalni dizajn konfiguracije ležajeva ima odlučujući doprinos na učinkovitost i vijek trajanja glavnog vretena odnosno motorvretena.

### 4.1. Ležajevi

Kod uležištenja motorvretena koriste se sljedeći tipovi ležajeva, slika 4.1., ovisno o zahtjevima u odgovarajućem području primjene:

- kotrljajući ležajevi,
- elektromagnetski ležajevi,
- zračni ležajevi,
- hidrostatski ležajevi,
- hidrodinamski ležajevi.



	valjni ležaj	hidrodin. ležaj	hidrost. ležaj	zračni ležaj	magn. ležaj	
koeficijent brzine $nxd_m$	1)					potpuno ispunjeno ispunjeno djelomično ispunjeno nije ispunjeno
dugotrajnost			2)	2)	2)	
visoka točnost rada						
visoko prigušenje						
visoka krutost						
niski troškovi/ jednostavno podmazivanje	3)				4)	
nisko trenje						
niski troškovi	3)					

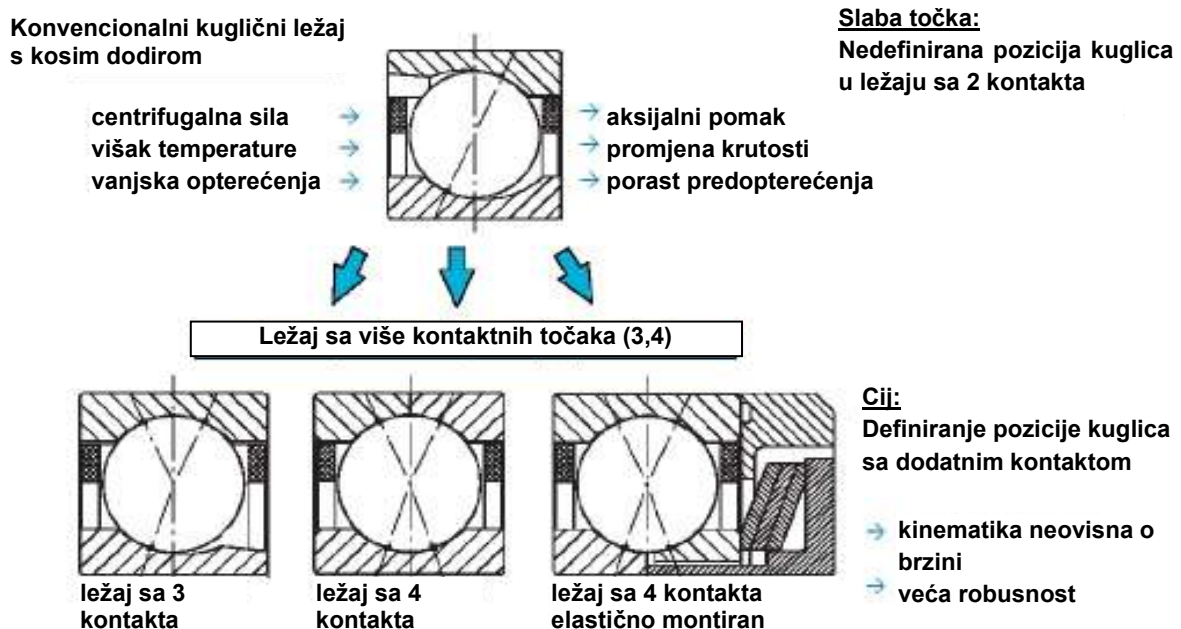
1) ovisno o sustavu podmazivanja i tipu ležaja  
 2) neograničeni vijek trajanja pod normalnim uvjetima  
 3) djelomično ispunjeno sa podmazivanjem uljem  
 4) visoka kompleksnost magnetske regulacije

Slika 4.1. Usporedba svojstava sustava uležištenja motorvretena [2]

#### 4.1.1. Kotrljajući kuglični ležajevi

Pri koeficijentu specifične brzine do najviše  $3,0 \times 10^6$  mm / min (npr. operacija glodanja), glavna vretena s visokom aksijalnom i radijalnom krutošću uglavnom su montirana na kuglične ležajeve. Visokoprecizni ležajevi vretena kombiniraju svojstva radijalne zračnosti i krutosti s niskim naporom montaže i održavanja, te dobrim omjerom isplativosti i učinkovitosti. Moderni kuglični ležajevi proizvode manje gubitaka uslijed trenja s lakšim tokom podmazivanja, budući da oni imaju manje dodirnih površina. Zahtjevi za povećane brzine doveli su do razvoja posebnih vrsta visokobrzinskih i hibridnih ležajeva. VB ležajevi imaju veći broj manjih kuglica. Hibridni ležajevi posjeduju silicij-nitridne kuglice ( $Si_3N_4$ ) s manjom gustoćom od  $3,16 \text{ g/cm}^3$  i većim modulom elastičnosti  $320\,000 \text{ N/mm}^2$  (u odnosu na uobičajene čelične valjne ležajeve 100Cr6 s gustoćom  $7,85 \text{ g/cm}^3$  i modula elastičnosti  $210\,000 \text{ N/mm}^2$ ). Modul elastičnosti bitno utječe na otpornost - veći modul elastičnosti rezultira većom krutošću. U kombinaciji s čelikom, keramički materijal ima izvrsna tribološka svojstva, što rezultira niskim trenjem i smanje trošenja.

Performanse je također moguće poboljšati pomoću posebnih visokonitriranih čeličnih ležajeva (HNS - High-Nitrided Steel), kod kojih je zbog finije mikrostrukture u kombinaciji s većom žilavošću omogućena primjena kod više razine opterećenja (u odnosu na 100Cr6 čelične ležajeve). Jedan od najnovijih razvoja teži prevlačenju valjnih površina sa tankim tvrdim filmom. Prevlake su namijenjene poboljšanju otpornosti na trošenje uz smanjenje koeficijenta trenja kontaktnih površina. Unatoč njihovim mnogih prednostima, valjni ležajevi također imaju izvedbena ograničenja, dijelom zbog geometrije kutnih kugličnih ležajeva. Radijalni pomak valjnih tijela ili radijalna širenje unutarnjeg prstena zbog centrifugalne sile ili toplinskeog širenja može dovesti do relativnog aksijalnog pomaka prstena u slučaju prilagodbe ležaja sa stalnim opterećenjem. Bilo kakvo smanjenje krutosti ležaja, zbog promjene u kutu kontakata ležaja, će smanjiti dinamičku krutost vretena. Cilj razvoja novih koncepata ležajeva je smanjenje nedostataka konvencionalnih ležajeva vretena. Ovi se koncepti temelje na ideji da se aksijalni i radijalni pomak kuglica može spriječiti dodatnim valjnim kontaktima u vanjskoj valjnoj stazi ležaja. Tipovi ležajeva ove vrste unutarnje geometrije se koriste eksperimentalno, na primjer u zrakoplovnim sektorima (zrakoplovni motori), te zahtijevaju drugačije podmazivanje i parametre valjnih kontakata. Pregled tih koncepata dan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Novi kinematički koncepti za kuglične ležajeve vretena [2]

Osim ležaja, sa *tri* valjna kontakta - dva kontakta na vanjskom prstenu, prikazane su *dvije* varijante ležajeva sa *četiri* valjna kontakta. U ležajevima sa *tri* valjna kontakta, problemi vezani uz pomak kuglica s porastom brzine vrtnje riješeni su dvostrukim valjnim kontaktom na vanjskom prstenu. Pri velikim brzinama, ipak, opterećenja na točke kontakata se snažno povećava zbog elastičnog i toplinskog širenje vretena, te ograničava dopuštene brzine vretena. Elastično opterećeni ležajevi sa *četiri* kontaktne točke nemaju taj nedostatak. Ako se javi promjena u kinematici kontakata zbog toplinskog širenja ili centrifugalne sile, podjeljena polovica unutarnjeg prstena će mijenjati svoju aksijalnu udaljenost dok se ne postigne nova ravnoteža. Ovaj ležaj je osiguran od preopterećenja pomoću opruga. Sila opruge, u svim slučajevima, mora biti veća od maksimalnog aksijalnog opterećenje vretena u smjeru u kojem su se prstenovi odvajali. Na slici 4.3. prikazan je dvostruki kuglični ležaj s kosim dodirom koji se često može naći u primjeni zbog dobre krutosti u oba aksijalna smjera.



Slika 4.3. Dvostruki kuglični ležaj s kosim dodirom [4]

#### 4.1.2. *Kotrljajući valjkasti ležajevi*

Cilindrični i stožasti valjkasti ležajevi s jednim ili više redova se najčešće koriste na vretenima alatnih strojeva. Visokoprecizni cilindrični valjkasti ležajevi su se koristili naročito kao pokretni ležajevi na osovinama, ali isto tako mogu biti montirani za povećanje radijalne krutosti u području nosa vretena. Zbog puno veće kontaktne površine između valjnih elemenata i valjne staze, cilindrični valjkasti ležajevi imaju puno veću krutost od kugličnih ležajeva, te su u stanju podnijeti veća opterećenja. Međutim, veće kontaktne površine proizvode veće trenje i otežano je podmazivanje. U odnosu na kuglične ležajeve s kosim dodirom, oni rotiraju samo u jednom smjeru, što je kinematski povoljnije. Kritični radni uvjeti javljaju se osobito kada postoje temperaturni gradijenti između unutarnjeg i vanjskog prstena. Vanjski prsten obično može raspršiti toplinu znatno bolje od unutarnjeg prstena, putem dijelova kućišta. Toplinski izazvano radijalno širenje unutarnjeg prstena izravno mijenja predopterećenje postavljeno tijekom montaže. Na slici 4.4. je prikazan jedan tip kotrljajućeg valjkastog ležaja za primjenu kod većih radijalnih opterećenja i s mogućnošću zakretanja.



Slika 4.4. Dvostruki kotrljajući valjkasti ležaj [5]

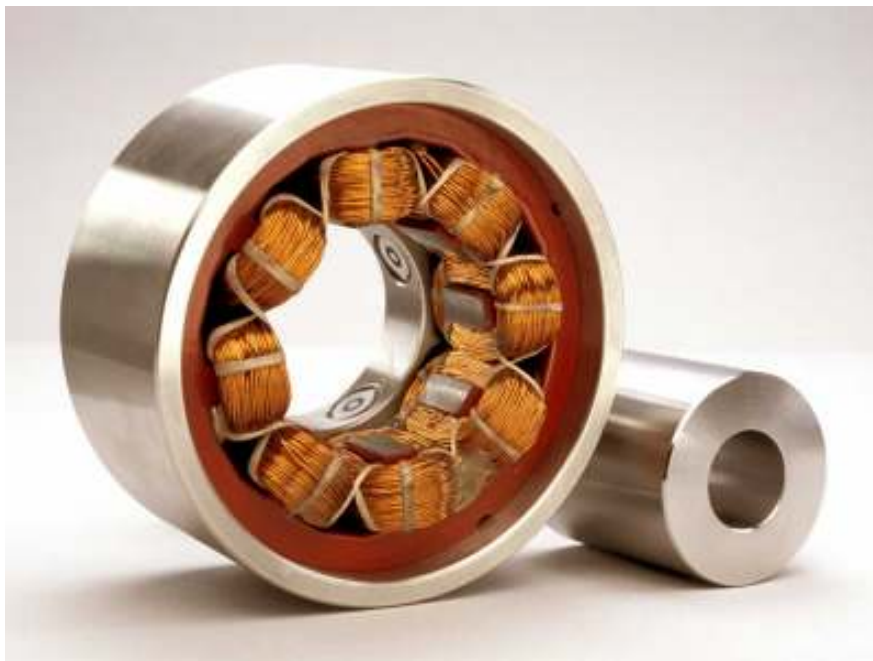
Povećano predopterećenje u okretanju povećava toplinsku energiju u ležaju. Kada je prag vrijednosti predopterećenja postignut, ležaj nije više u stanju dovoljno brzo trošiti proizvedenu toplinu, pogotovo sa unutarnjeg prstena. Za smanjenje trenja, a time i prekomjerne proizvodnje toplinske energije u ležajevima koriste se manje valjak/prsten kontaktne zone, profilirana valjanja tijela, te keramička valjna tijela. Na slici 4.5. prikazana su neka konstruktivna rješenja. Smanjenje radijalne krutosti za valjkaste ležajeve, koja ide uz modifikaciju komponenata ležaja, može se smatrati neproblematičnom s gledišta statike i dinamike nosivog sustava vretena, jer je početna krutost uvijek veća od one kod kugličnih ležajeva.



Slika 4.5. Konstruktivna rješenja ležajeva u svrhu smanjenja trenja [2]

### 4.1.3. Magnetski ležajevi

Motorvretena opremljena elektromagnetskim ležajevima pokrivaju širok raspon primjena pri velikim brzinama. Zbog relativno velike zračnosti između rotora i statora, u aksijalnim i radijalnim ležajevima, trenje je zanemarivo i ležajevi mogu raditi sa minimalnim trošenjem. Budući da su magnetski ležajevi aktivno kontrolirani mogu se podesiti svojstva krutosti i prigušenja. Zahvaljujući integralnom ponašanju kontrolera, maksimalna moguća statička krutosti magnetskog ležaja je usporedivo veća nego kod valjnih ležajeva. Međutim, vrijednost maksimalnog opterećenja je znatno niža nego kod kotrljajućih valjnih ležajeva. Čak i pri visokim brzinama vrtnje, rotor u magnetskom ležaj može imati ekscentričnu stazu, dopuštajući određeni stupanj samobalansiranja. Zbog visokih troškova složenih sustava kontrole i periferije ovih motorvretena, trenutno se koriste samo u posebnim primjenama. Na primjer, u istraživačkom polju magnetski ležajevi se koriste kao pokretači za beskontaktnu primjenu nosivog sustava vretena ili kao dodatni ležajevi montirani s konvencionalnim ležajevima da poboljšaju aktivan utjecaj ležajeva na motorvreteno.



Slika 4.6. Magnetski ležaj [5]

#### **4.1.4. Hidrostatski i hidrodinamski ležajevi**

Ovisno o željenoj brzini vrtnje, glavna vretena s hidrostatskim ili hidrodinamskim ležajevima se najčešće koriste za visokopreciznu proizvodnju u sektoru obrade metala. U usporedbi sa valjnim ležajevima, uz dobra svojstva prigušenja i visoke krutosti, imaju prednost postizanja minimalnog radijalnog i aksijalnog bacanja. Kao rezultat povećanog zagrijavanja tekućine, zbog unutarnjih efekata smicanja, postoji ograničenje na brzinu vretena koja imaju veća alatna sučelja (npr. HSK 63; oko  $10\ 000\ \text{min}^{-1}$ ). Nedavna istraživanja pokazuju korištenje vode kao tekućine hidrostatskog ležaja kako bi se smanjili gubici trenja i optimizirala svojstva brzine vrtnje. Hidrodinamski ležajevi su se koristiti samo tamo gdje su uvjeti rada u rangu čistog tekućinskog trenja bez varijacije brzine. Na vretenima koja se sporo vrte ili vretena sa čestim pokretanjem i zaustavljanjem (npr. izmjena alata), rad u uvjetima mješovitog trenja uzrokuje povećano trošenje i velike gubitke trenja.

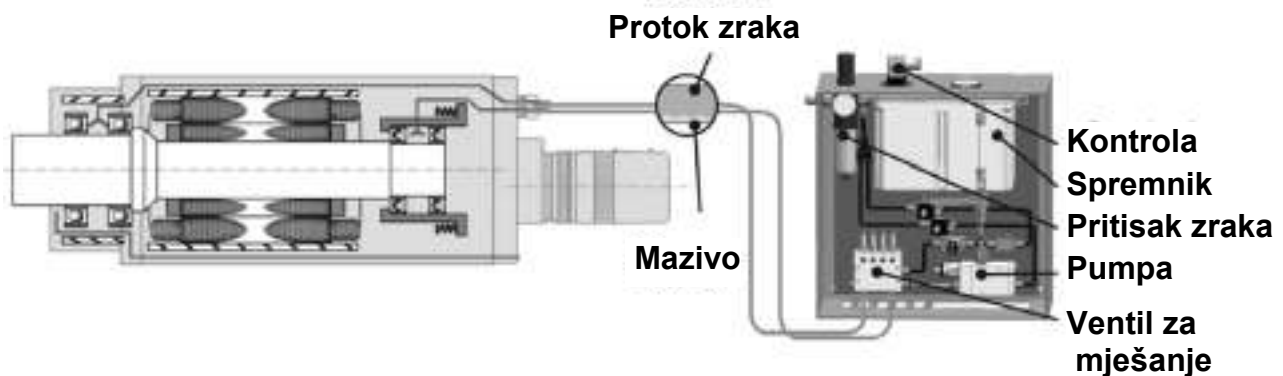
#### **4.1.5. Zračni ležajevi**

Zračni ležajevi se koriste kada treba postići mnogo veće rotacijski brzine. Oni rade na istom principu kao i tekućinom podmazivani ležajevi, ali aktivni medij je plinoviti zrak, uz nižu viskoznosti 2 do 3 reda veličine. U cilju ostvarenja visoke nosivosti i krutosti, moraju se koristiti vrlo mali razmaci unutar ležajeva. Zbog niske protočne mase i malog specifičnog toplinskog kapaciteta zraka, toplina trenja proizvedena zbog posmičnih sila ne može se u potpunosti raspršiti pri velikim brzinama komponenata ležajeva. Visokobrzinska vretena sa zračnim ležajevima stoga zahtijevaju dodatno hlađenje. Viskoznost zraka je gotovo neovisna o temperaturi. Kod određenih pritisaka, stlačivost zraka uzrokuje pneumatsku nestabilnost, što znači da bi zračni ležajevi s napojnim pritiscima između  $4$  i  $10 \times 10^5$  Pascala po mogućnosti trebali raditi u području laminarnog strujanja. Niski pritisci podrazumijevaju relativno nisko nazivno opterećenje i krutost, te zahtijevaju mnogo veće dimenzije od hidrostatskih ležajeva.



#### 4.1.6. Podmazivanje ležajeva

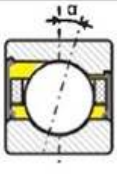
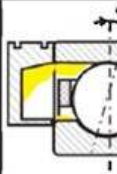

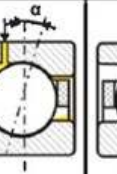
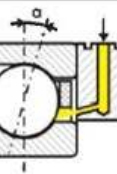
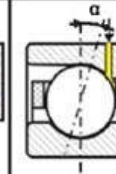
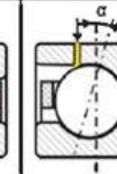
Tribološki sustav valjnih kontakata ležaja karakteriziran je velikim opterećenjima valjanjnih kontakata i, u normalnom slučaju, niskim opterećenjem kliznih kontakata (valjna tijela / kavez, kavez / ležajni prsten). Glavna zadaća maziva (međupovršinski medij) u valjnim ležajevima je formiranje podmazivajućeg filma u odgovarajućim kontaktnim zonama valjnih tijela, ležajnih prstena i kaveza, tako da se kontakt između površina - što rezultira trenjem i trošenjem (DIN 50322) - smanjuje. Ona također služi za smanjenje korozije i raspršenje topline trenja. Metode koje su na raspolaganju za podmazivanje glavnog vretena alatnog stroja, ovisno o rasponu brzine su: podmazivanje mašću, podmazivanje kombinacijom ulje - zrak i podmazivanje ubrizgavanjem ulja. Oko 90% svih valjnih ležajeva rade s podmazivanjem mašću. U ovom obliku podmazivanja ležajevi su napunjeni mašću prije ugradnje, a također se spominje kao trajno podmazivanje za cijeli vijek trajanja ležaja. Koeficijenti brzine i do  $2.0 \times 10^6$  mm / min mogu se postići optimiziranjem kemijskog sastava masti i prilagođavanjem za podmazivanje keramičkih materijala kuglica korištenih u modernim ležajevima visokobrzinskih vretena. Podmazivanje ulje - zrak (slika 4.7.) može se koristiti za primjenu s koeficijentima brzine do  $3.0 \times 10^6$  mm / min. Načelo podmazivanja zasniva se na kontinuiranom doziranju komprimiranog zraka pomiješanog s uljem na ležaj. Ovisno o veličini ležaja, za podmazivanje je dovoljna količina ulja manja od  $60 - 200$  mm<sup>3</sup> / h po ležaju. Mogu se koristiti ulja viskoznosti između 32 i 100 mm<sup>2</sup> / s i tlak je između 2 i 6 bara, ovisno o preporukama proizvođača i dizajnu.



Slika 4.7. Prikaz sustava podmazivanja ulje - zrak za motorvretena [2]



U tim sklopovima, pritisak je u distribucijskom sustavu dobiven od strane pumpe, ili se koristi statički pritisak iz rezervoara koji se doprema na ventile za doziranje. Ventili propuštaju definirane količine ulja (obično  $10 \text{ mm}^3$ ) do komore za miješanje, gdje se miješa sa stalnim protokom zraka. Mješavina se tankim cjevčicama doprema do ležaja i kroz mlaznice podmazuje ležaj radijalno ili aksijalno. U podmazivanju ulje-zrak, volumetrijski protok je određen vremenskim ciklusom, koji određuje trajanje između pojedinih impulsa podmazivanje ili vrijeme uključivanja ventila. Neki sustavi u trenutnoj upotrebi, koriste senzore za praćenje razine ulja, pritiska ulja i zraka, zajedno sa ventilima za doziranje. Dobava maziva do valjnih kontakata razlikuje se ovisno o vrsti ležajeva. Mazivo se može dobiti iz spremnika izravno na sam ležaj ili uz pomoć dobavnih linija u neposrednu blizinu ležaja. Mazivo se na ležaj dobavlja aksijalno ili radijalno kroz rupu. U slučaju ležajeva vretena, primjenjuju se različite vrste dobave, ovisno o geometriji i okolnim komponentama. Slika 4.8. daje pregled tipova u upotrebi.

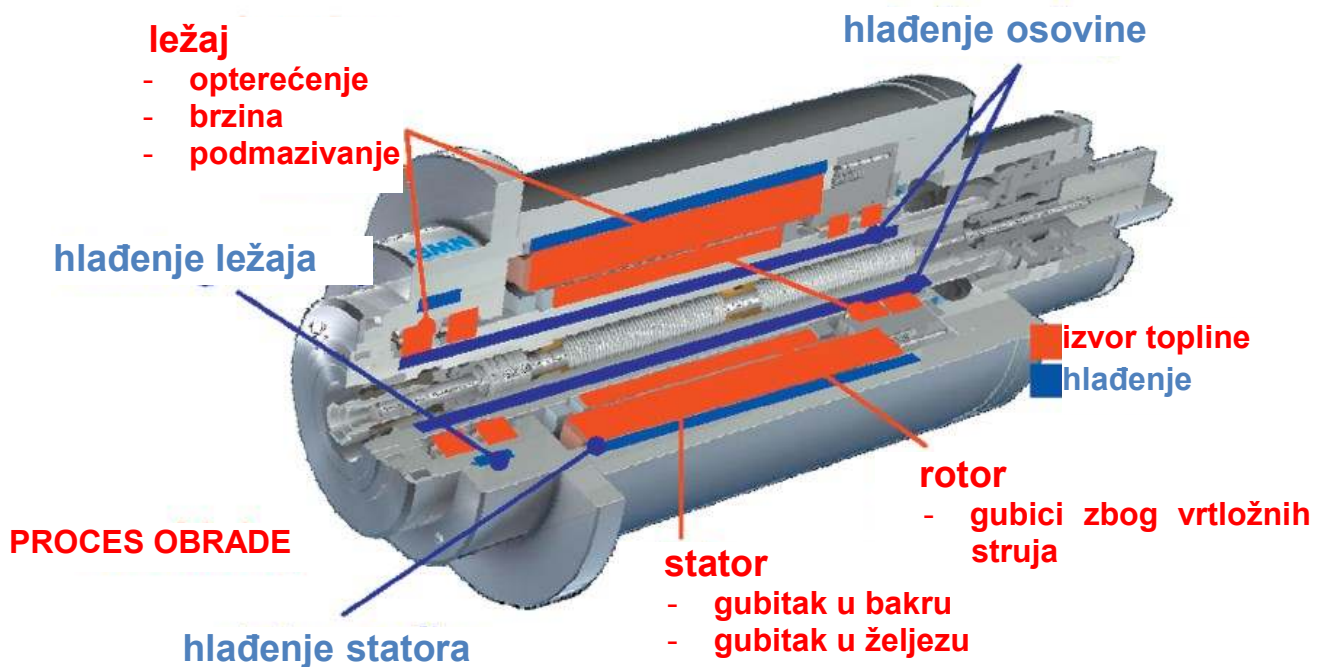
Oblik ležaja							
Svojstva							
Dizajn	Zapečaćen	Otvoren	Otvoren (sa provrtom u VP)	Otvoren	Provrt u VP (kosi kontakt)	Provrt u VP	Provrt i utori u VP
Podmazivanje	Trajno podm. mašču	Trajno podm. mašču	Ponovno podmazivanje	Podmazivanje ulje-zrak			
Spremnik/dobava maziva	Spremnik u ležaju	Spremnik u kućištu	Vanjski spr. u kućištu ili VP	Aksijalno	Provrti za radijalnu dobavu u vanjskom prstenu (VP)		
Ostvarivi koef. brzine	$< 2,0 \cdot 10^6$	$< 2,0 \cdot 10^6$	$< 2,2 \cdot 10^6$	$< 3,0 \cdot 10^6$	$< 3,0 \cdot 10^6$		
Prednosti	-mali dizajn -zatvoreni sustav	-standardne komponente -podesiva vel. spremnika	-dulji vijek trajanja -promjenjiva količina masti	-standardne komponente -dulji vijek trajanja	-direktna dobava maziva u ležaj -dulji vijek trajanja		
Nedostaci	-ograničen koef. brzine -ograničena sposobnost ubrzanja -viša cijena pojedine komponente			Potrebna adekvatna dobava i uklanjanje maziva		-viši troškovi zbog provrta (i utora) -slabljenje zbog provrta (i utora) -potrebna adekvatna dobava i uklanjanje maziva	
				Potreban je kompleksni sustav za ponovno podmazivanje			

Slika 4.8. Sustavi podmazivanje ležajeva [2]

## 4.2. Hlađenje

### 4.2.1. Hlađenje motora

Motorvretena su opremljena sa motorima velike snage koji proizvode veliku količinu nepotrebne topline. Zbog toga, u većini primjena kroz kućišta vretena teče rashladni medij u zatvorenom krugu hlađenja, slika 4.9. Stoga je ova metoda hlađenja vrlo složena zbog perifernih jedinica (rashladna jedinica, kružna pumpa). Nova razvijena rješenja uzimaju u obzir smiještanje vretena u kutna kućišta. Pozadina kućišta je proširena i opremljena zasebno pogonjenim ventilatorom. Kućište u svojim kutevima ima odvođe kojima zrak, nastao od ventilatora, struji u aksijalnom smjeru. Dodatni učinak hlađenja postiže se generiranjem protoka zraka kroz zračni zazor motora.



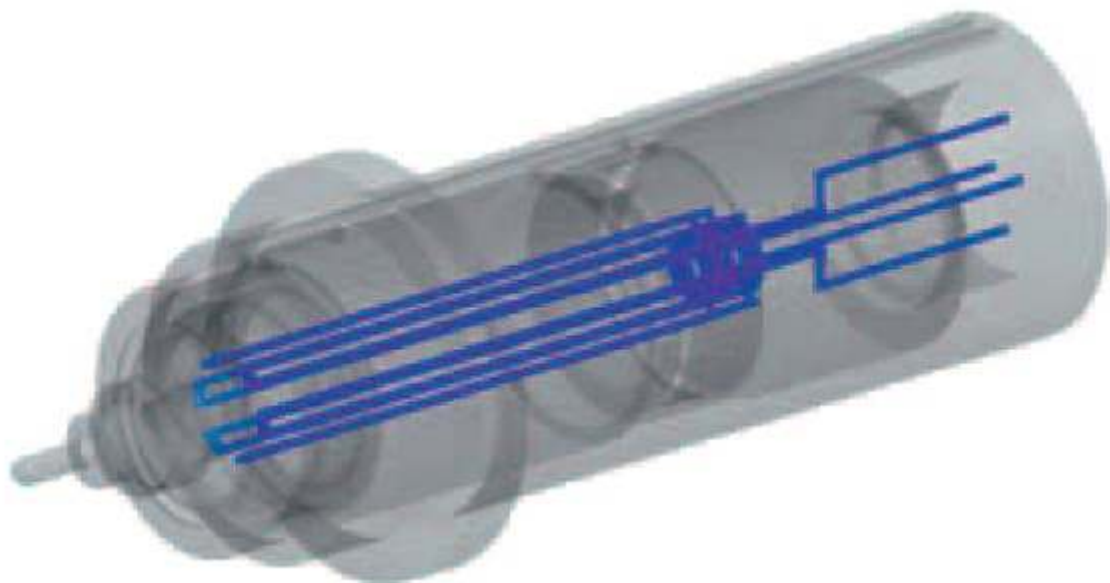
Slika 4.9. Hlađenje motora i ležajeva [2]

#### 4.2.2. Hlađenje ležajeva

Kako bi se smanjile toplinske deformacije sustava zračnih vretena predložena je kontrola temperature dobavnog zraka koja se temelji na konceptu toplinske ravnoteže. Razvijeni sustav osigurava toplinsku ravnotežu između topline razvijene u ležaju i efekta hlađenja dobavnim zrakom. Dakle, moguće je eliminirati toplinske deformacije cjelokupnog sustava zračnog vretena uključujući i okolne dijelove sustava.

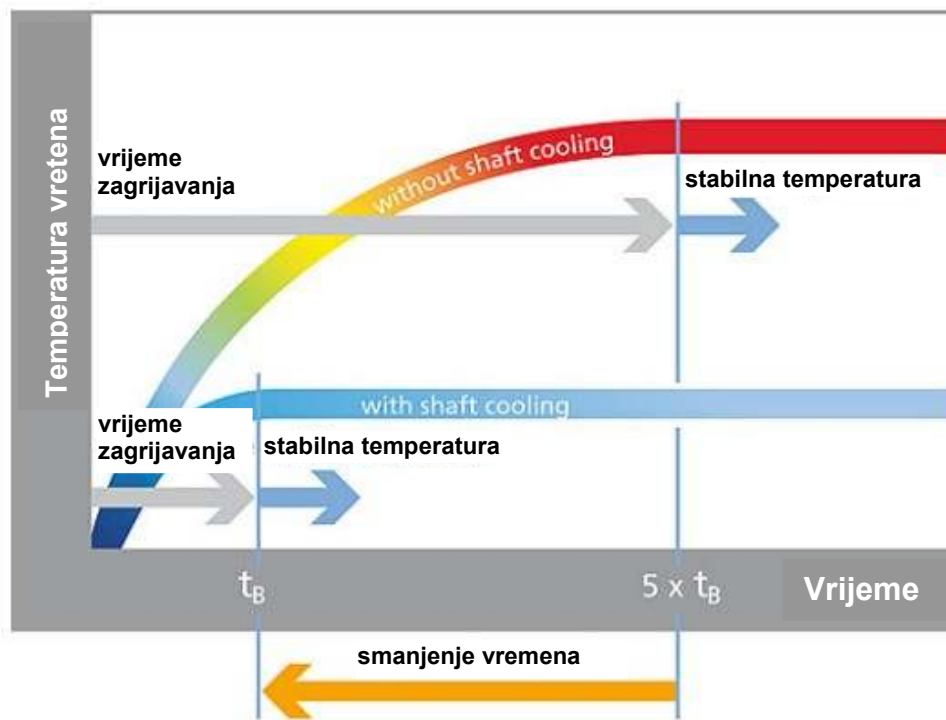
#### 4.2.3. Hlađenje glavnog vretena

Novorazvijena motorvretenavretena temelje se na unutrašnjem hlađenju glavnog vretena kao što je prikazano na slici 4.10. Središnja komponenta je rotacijska jedinica sa po najmanje *tri* odvojena priključka. Hlađenje se može primijeniti preko aksijalnog sučelja i raspršivati preko radijalnih predajnih točaka. To znači da je krug hlađenja kroz vreteno ostvaren. Značajna prednost ovog sustava je znatno skraćeno vrijeme do postizanja stabilnog toplinskog stanja i kroz ovo je postignut smanjen ulaz topline vretena u alat. Stoga je i znatno smanjeno toplinski izazvano širenje vretena.



Slika 4.10. Hlađenje glavnog vretena[2]

Ovaj sustav hlađenja razvijen je od strane tvrtke Fischer AG. Kada su glavni izvori topline poput rotora i ležajeva hlađeni izravno, testovi pokazuju da iz vretena može biti uklonjeno do 1kW dodatnih gubitaka. Prema tome, vrijeme zagrijavanja vretena je smanjeno i do 80% i manje topline se preselilo u stroj. U odnosu na konvencionalni sustav hlađenja, na alatnom sučelju je postignuto smanjenje temperature od 25°C. Ovi testovi dokazuju da motorvretena (FISCHER vretena ) ne zagrijavaju rezni alat [6].

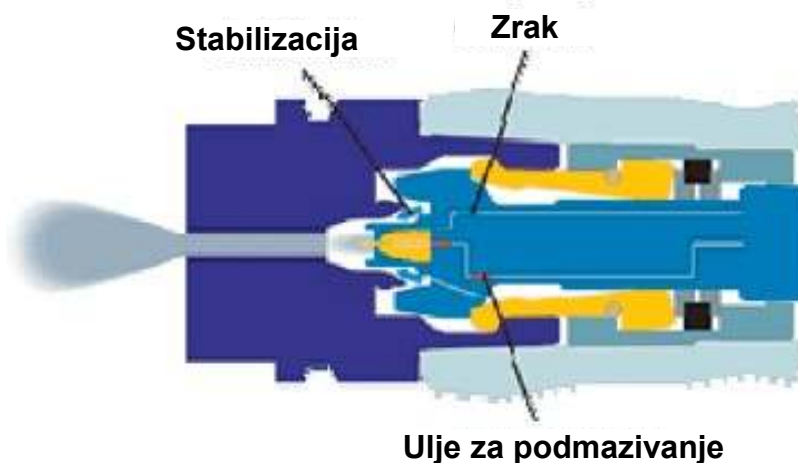


Slika 4.11. Dijagram zagrijavanja vretena [6]

### 4.3. Unutarnja dobava rashladnog sredstva

Za prolaz tekućeg rashladnog medija kroz rotirajuće vreteno do reznog alata potrebne su takozvane rotacijske jedinice. Postoje u osnovi kontaktne i beskontakne rješenja. Za uporabu u motorvretenima u obzir se uzimaju beskontakne rotacijske jedinice opremljene zračnim brtvama. Ovaj sustav pogodan je za brzine vrtnje do  $60\,000\text{ min}^{-1}$  i pritisak medija do 4 MPa uz minimalno curenje. Predviđa se i razvoj za rotacijske brzine do  $90\,000\text{ min}^{-1}$ . Mnogi materijali za brtvljenje beskontaktnih rotacijskih jedinica dizajnirani su za rad s bilo kojim mazivom za hlađenje ili minimalnom količinom podmazivanja (MQL - Minimum Quantity Lubrication). Promjena vrste opskrbe maziva može oštetiti brtve. U takvom je slučaju

predviđeno rješenje koje omogućuje prebacivanje između oba rashladna sustava. Popularnost MQL-a je narasla u posljednjih nekoliko godina u nastojanju da se minimalizira utjecaj na okoliš. Vrlo je problematična unutarnja opskrba s predmješanim aerosolima - povećanjem brzine vrtnje dolazi do razdvajanja aerosola. To je uglavnom posljedica centripetalne sile koja djeluje na kapljice ulja što dovodi do raspršivanja ulja po stjenkama podmazivačkog sklopa. U svrhu analize utjecaja centripetalne sile fokusira se na veličine kapljica; manje kapljice - manje snage. Razgradnja je manje intenzivna dok je u isto vrijeme efekt podmazivanja utjecajniji. Kao razlozi za značajan gubitak ulja unutar vretena identificirani su: hlapljenje u presjeku, mrtav prostor i propuštanje. Razvijeno je rješenje s okretno montiranom cijevi unutar vretena - dok se vreteno okreće, cijev stoji. U ovoj izvedbi centripetalne sile ne utječu na aerosol u unutrašnjosti cijevi. Beskontaktna rotacijska jedinica omogućuje prijenos medija na rotirajući alat. Zrak i ulje se vode kroz dva odvojena kanala unutar vretena i mješaju se neposredno prije alata kao što je prikazano na slici 4.12.



Slika 4.12. Izbjegavanje razdvajanja aerosola [7]

#### 4.4. Stezanje alata i mehanizmi otpuštanja

U većini slučajeva sila stezanja je osigurana pomoću aksijalno složenih disk opruga ili spiralnih opruga. Međutim, ove opruge su izvor neravnoteže u radu jer raspodjela mase može varirati. Jedna mogućnost je da se umjesto čeličnih opruga koriste plinske. Prednost ove varijacije je homogena raspodjela mase. Jedan od problema kod plinske opruge je gubitak tlaka što rezultira gubitkom stezne snage. Stoga je potrebno trajno pratiti opterećenje opruge. Danas se umjesto hidrauličkog sustava ili opruga za stezanje koristi sustav stezanja alata sa električnim linearnim motorom. Osim što je skraćeno vrijeme promjene alata i postiže se povećana kvaliteta balansa vretena, sila stezanja se može kontinuirano pratiti.

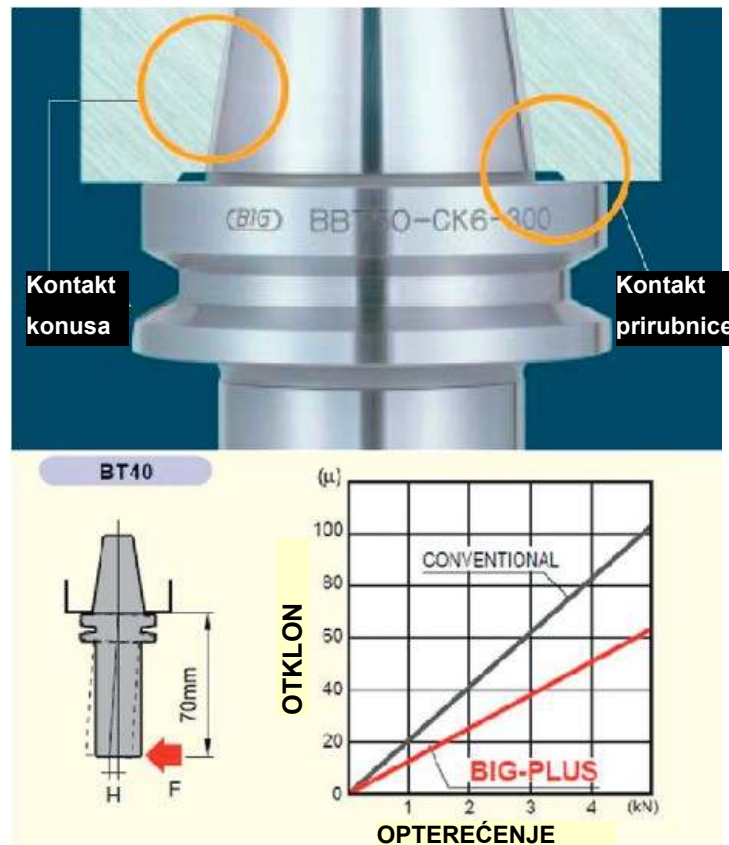
## 4.5. Sučelja

### 4.5.1. Sučelje vreteno/alat

Sučelje između alata i vretena je osnovni držač alata. Uz povećanje krutosti, odgovarajućeg prigušenja i sposobnosti prijenosa potrebnih snaga / momenata, ti sustavi trebaju omogućiti brz, precizan i pouzdan postupak izmjene alata.

### 4.5.2. Strmi konus, SK konus

Glavni nedostatak konvencionalnog strmog konusa su manje kontaktne površine između konusa osnovnog držača alata i vretena. U usporedbi s HSK držačima alata (HSK = Hohlschaftkegel) postoji primjetno niža krutost SK konusa. Komercijalno dostupan strmi konus naziva se „Big-Plus“. Ovi držači alata eliminiraju spomenute nedostatke SK držača alata kroz različite optimizacije konusa i stezanje alata. Dodana je dodatna kontaktne površine prirubnice kao što je prikazano na slici 4.13. - gore. S jedne strane to dovodi do ponavljanja visoke točnosti u stezanju alata. S druge strane postiže se značajan porast krutosti u odnosu na uobičajene strme konuse, slika 4.13. - dolje.



Slika 4.13. „Big-Plus“ konus i njegove prednosti [2]



### 4.5.3. HSK držači alata

Već dugi niz godina HSK sučelje se može smatrati standardnim u postupku VBO glodanja. Statičke i dinamičke karakteristike HSK držača alata su analizirane od strane mnogih institucija i istraživača. U smislu uravnoteženja alata, SK i HSK adapteri su slični. HSK adapteri se normalno prodaju nebalansirani, ali ako kupac zahtjeva balansiranje, mora to navesti prilikom narudžbe. Dvije metode koriste se za balansiranje HSK alata. Prva metoda je skidanjem viška materijala iz kućišta adaptera pomoću reznog alata. Ova metoda se preporučuje za toplinski osjetljive strojne obrade, i alat i držač moraju biti balansirani (obično od strane proizvođača). Druga metoda uključuje podesive komponente kao što su vijci koji omogućuju fino ugađanje alatnog sklopa prije uporabe. Iako je ova metoda točnija, ona također zahtijeva česte intervencije korisnika radi prilagodbe balansiranja.

I HSK i strmi konus omogućuju korištenje internog dotoka sredstva za hlađenje. Kod brzine vrtnje vretena preko  $20\ 000\ \text{min}^{-1}$ , unutarnji rashladno sredstvo može uništiti statičku ravnotežu sklopa vreteno / držač. To se može dogoditi zbog asimetričnih kanala za rashladno sredstvo u izradi alata ili kontaminacije zrakom i uljem. U tim je slučajevima možda potrebna upotreba vanjskog rashladnog sredstva. Na slici 4.14. su prikazani neki tipovi HSK držača koji se mogu pronaći u svakodnevnoj primjeni.



Slika 4.14. HSK držači alata [8]

HSK alati se proizvode u skladu sa specifikacijama strožim nego kod alata sa strmim konusima. Razlog za uže tolerancije je to što se sila stezanja mehanizma poboljšava kako se razmak između nosača alata i prihvata smanjuje. Kao rezultat njegovih minimalnih razmaka, HSK sučelje zahtijeva još veću pažnju na čistoću površina tijela nego što je potrebno kada se koriste konvencionalni držači alata. HSK alati su stoga više osjetljiviji na trošenje od drugih vrsta alata. To znači da korisnici moraju imati vlastite sustave kontrole ili koristiti vanjske inspeksijske službe za kontrolu kvalitete alata.

HSK sustav je dobro pogodan za modularno alatničarstvo. Zbog izvrsne krutosti i točnosti ovog sučelja, alatni sklopovi koje sadrže nastavake i redukcije mogu se koristiti usporedivo s rezultatima koji se dostižu kada se koriste čvrsti adapteri. Većina proizvođača reznih alata danas nudi HSK modularne alate. Ovi alati su prilagodljivi vlasničkim proizvodima različitih proizvođača, kao što su Sandvik „Capto“, Komet „ABS“ i Kennametal „KM“. Kada je na određeni stroj instalirano HSK vreteno, mogu se koristiti alati za rezanje sa postojećeg popisa, literatura [9].

#### 4.5.4. Sandvik „Coromant Capto“

Sandvik Coromant tvrtka razvila sustav koji se zove „Coromant Capto“, koji je izvorno dizajniran za modularnu izgradnju dugih alata. Ovaj sustav je uglavnom karakterističan po vrlo ravnom konusu (konus 1:20) s poligonalnim oblikom vanjske konturne. Zbog svoje dobre karakteristike simetrije, visoke krutosti i prijenosa velikog okretnog momenta, ovaj sustav je također odgovarajuć kao sučelje između vretena i nosača alata. Sandvik Coromant je pionir razvoja brzo izmjenjivih modularnih alata. S „Coromant Capto“, izumom tvrtke Sandvik Coromant, alati se lako mogu slagati zajedno da se formira veliki raspon kombinacija reznih alata. Inventar alata može biti drastično smanjen, zajedno sa pripadajućim rukovanjem alatima i troškovima ulaganja. „Coromant Capto“ nudi fleksibilnost i značajno smanjenje inventara alata. Zahtjevi za alate različitih mjernih duljina lako se postižu standardnim adapterima i nastavcima. Sklopovi sa složenim značajkama komponenti su brzo sastavljeni od standardnih „Coromant Capto“ alata.

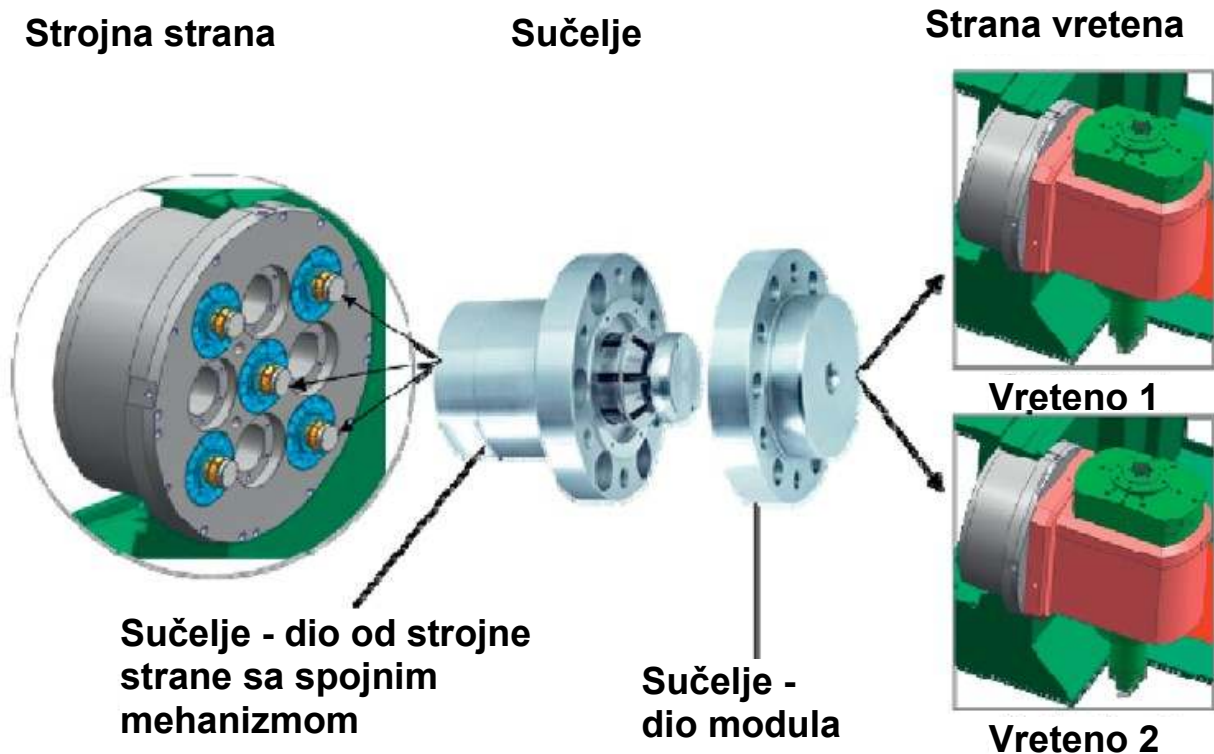
Kada je integriran u vreteno obradnog centra, „Coromant Capto“ daje vrhunske rezultate:

- jedan jedini sustav alata za stroj,
- zbog krutosti priključka može se potpuno iskoristi maksimalna snaga stroja,
- alati koji su relativno malih dimenzija i težine - kraći prevjesi poboljšavaju produktivnost i kvalitetu obrađivanog dijela,
- standardni držač i izbor alata za mogućnost samoizmjene alata.



#### 4.5.5. Sučelje vreteno/alatni stoj

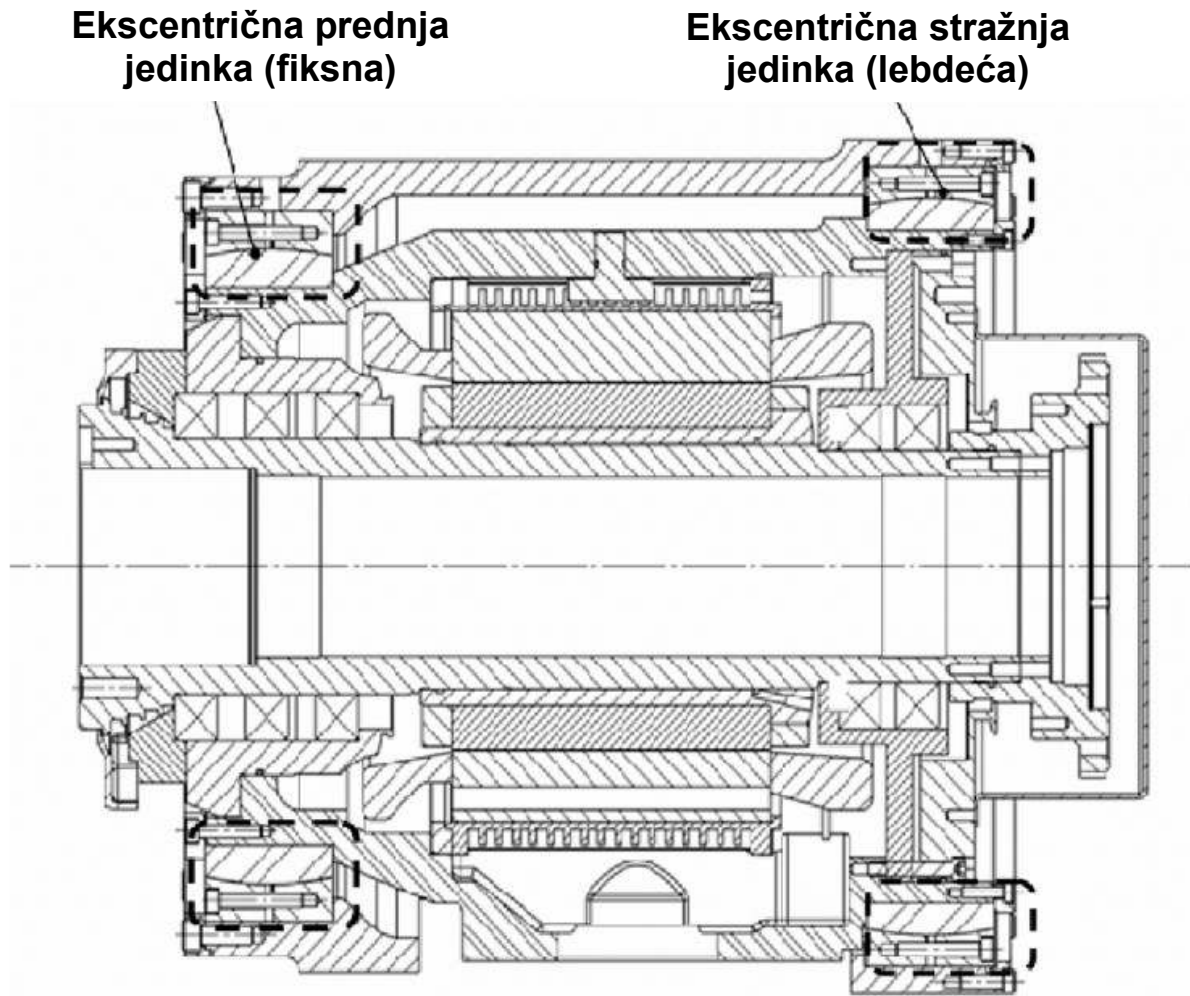
Razvoj rekonfigurabilni alatnih strojeva zahtjeva nove koncepte za sučelja vreteno / alatni stroj. Sastavljaju se različiti zahtjevi za sučelja rekonfigurabilnih alatnih strojeva te se predlaže sučelje koje se temelji na modularnom konceptu gdje se u skladu sa zahtjevima krutosti - može koristiti i do 9 priključnih mehanizama. Sa ovim sučeljem promjena različitih modula vretena je moguća u roku od manje 30 minuta, slika 4.15.



Slika 4.15. Sučelje vretena temeljeno na principu modularne gradnje [2]

Daljnji zahtjevi za sučelje motorvreteno / alatni stroj su svi konektori, za energiju ili informacije i oni bi trebali biti uključeni u sučelje, a također i sve komponente bi trebale ponuditi visoke krutosti i prigušenja. Razvijen je i novi model glavnog vretena tokarilice. Sučelja unutar vretena su podešena tako da čak i operater na stroju sam može obaviti zamjenu i poravnanje. U tu svrhu, u području stražnjeg ležaja, ugrađen je uređaj za automatsko centriranje uređaja s odgovarajućim profilom.

U novorazvijenim modulima kombinirano je konvencionalno motorvreteno s dodatnim ekscentričnim jedinkama tj. uređajem za podešavanje, slika 4.16. On omogućuje poravnanje osi dva glavna vretena. Ova metoda dopušta zamjenu vretena ekscentričnim modulom vretena u manje od dva sata.

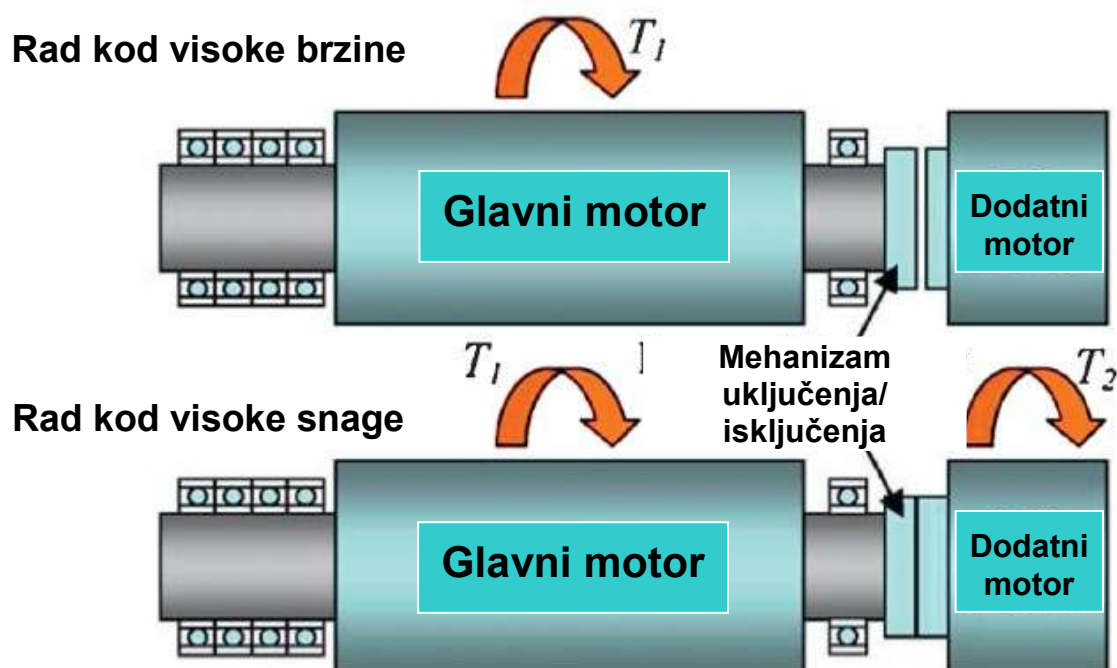


Slika 4.16. Modul motorvretena s dvostrukim ekscentričnim jedinkama [2]

## 5. POGONSKI KONCEPTI

### 5.1. Dizajn motora

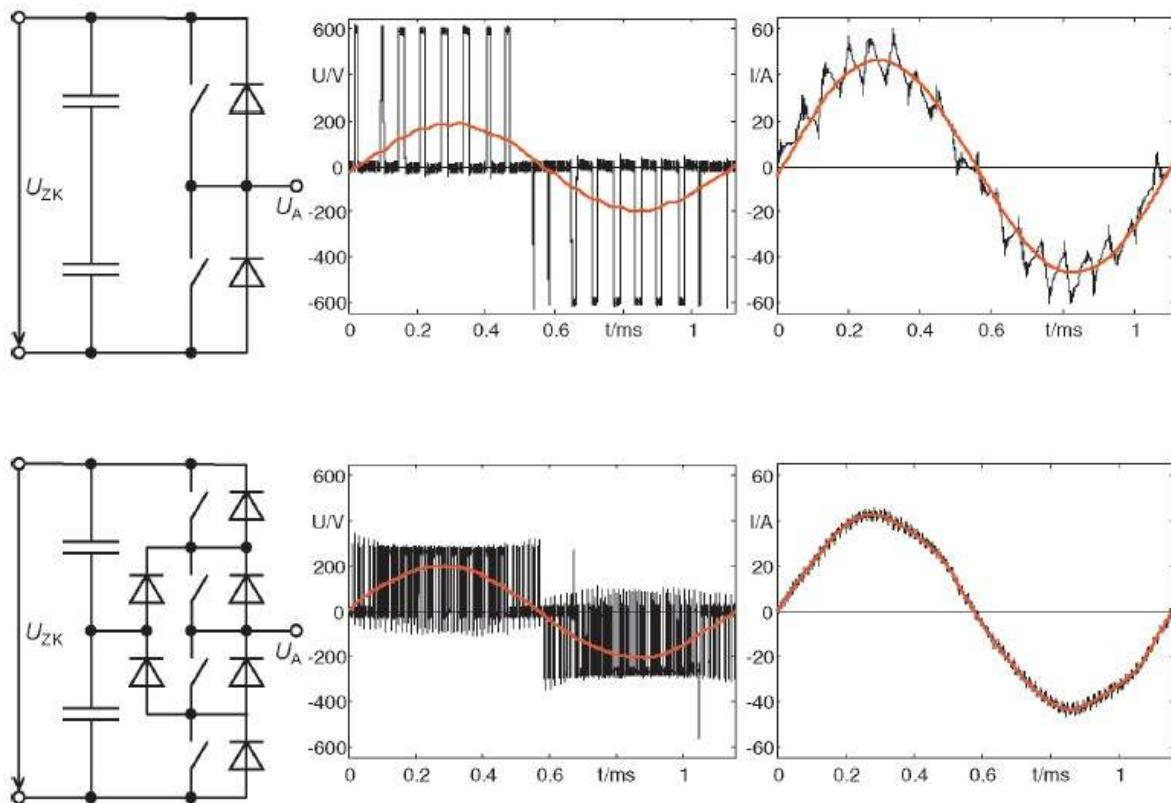
Danas višenamjenski alatni strojevi zahtijevaju motorvretena pogodna za rad s visokim brzinama vrtnje i nižim momentima, kao i motorvretena za teške grube obrade s usporedno niskim brzinama vrtnje i visokim okretnim momentom. Ti zahtjevi su ispunjeni s raznim rješenjima. Predloženo je, na vratilo motorvretena preko spojke spojiti dodatni električni motor (pomoćni prigon) kao što je prikazano na slici 5.1. Dok glavni pogon radi na visokim brzinama vrtnje i s razmjerno niskim momentom, drugi električni motor se uključuje pri niskim brzinama vrtnje i visokim okretnim momentima. Ova konstrukcija nudi različite prednosti, proširuje se funkcionalni raspon (moment, brzina vrtnje) vretena i ostvaruje se smanjenje torzijskih vibracija vretena i reznoga alata.



Slika 5.1. Motorvreteno s pomoćnim pogonom [2]

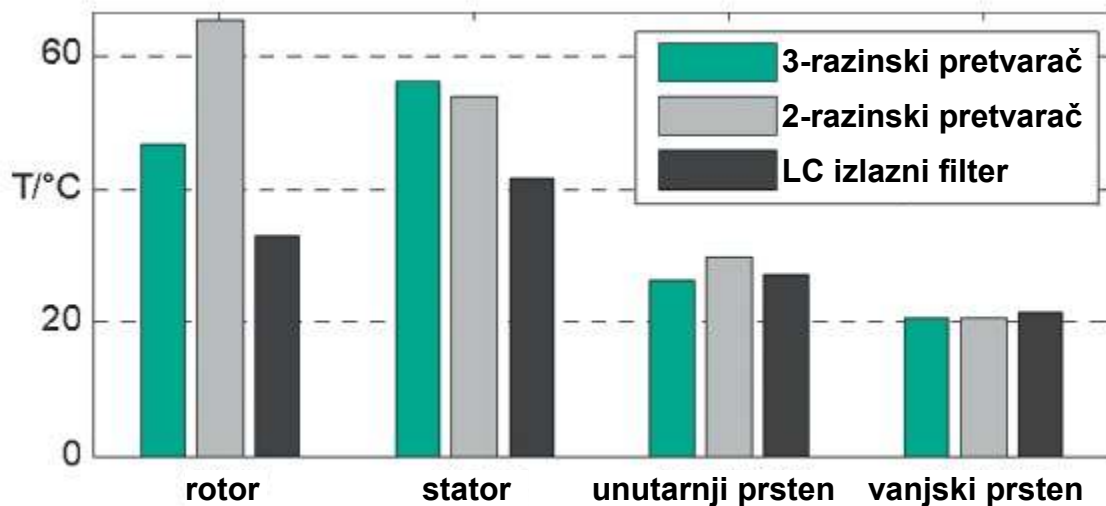
## 5.2. Pretvarač frekvencije

Pretvarači frekvencije su potrebni za pretvorbu konstantne trofazne opskrbe u promjenjivu trofaznu opskrbu. Cijela motorvretena su obično napajana od trofaznog, dvorazinskog pretvarača sa PWM izlazom (Pulse-width modulation). Modulacija širine impulsa (PWM), ili modulacija trajanja impulsa, je najčešće korištena tehnika za kontroliranje snage inercijskih električnih uređaja. Široko polje problema proizlazi iz nedovoljne opskrbe kroz pretvarač. Zbog prebacivanje načina rada, izlaz naponi nisu čisto sinusoidalni i sadrže prebacivanje harmonije. Ovaj harmonijski napon koji inducira struju ne doprinosi formiranju momenta nego samo nepoželjno grijanje različitih elemenata vretena. Za smanjenje harmonijskog sadržaja u opskrbi naponom i strujom uvedeni su trofazni, trirazinski pretvarači. Zbog dodatne snage poluvodiča ovi izmjenjivači imaju sposobnost da primjenjuju dodatni potencijal napona na motor. Značajno smanjuje sadržaj harmonije napona napajanja. Slika 5.2. prikazuje postavljanje dvaju različitih pretvarača i ostvarive napone i struje.



Slika 5.2. Shema, naponi i struje dvorazinskog(gore) i trirazinskog(dolje) pretvarača [2]

Druga mogućnost za prelaz preko navedenih problema koji proizlaze iz neadekvatne dobave napona je primjena LC izlaznog filtera između pretvarača frekvencije i motora. Ti filteri drugog reda prigušuju sadržaj harmonije u opskrbi. To rezultira u naponu i struji koji su vrlo blizu idealnog sinusnog oblika. U ovoj primjeni filtera treba obratiti pozornost na karakterističnu rezonantnu frekvenciju filtera kada nije uzbuđen ili od invertera ili od motora, jer to može uništiti pretvarač, filter ili motor. Dakle, sustav kontrole za filter napona i struja je uveden kako bi bili sigurni da su rezonantne frekvencije filtra dovoljno prigušene. Utjecaj koncepta dizajna pretvarača na temperaturno ponašanje jednog integriranog motorvretena sa trajnim magnetnim sinkronim motor je prikazan na slici 5.3. Najviše temperature su postignute s dvorazinskim pretvaračem, dok se kontrolom filtra postižu niže temperature.



Slika 5.3. Stacionarne temperature motora i prednjeg ležaja s tri različita pretvarača frekvencije [2]

## 6. INTEGRACIJA SENZORA I PRAĆENJE STANJA

### 6.1. Otkrivanje vibracija/ podrhtavanja

#### 6.1.1. Otkrivanje podrhtavanja tijekom procesa glodanja

U novijim trendovima prerađivačke industrije, visokobrzinske obrade, posebno visokobrzinsko glodanje, igraju važnu ulogu. Nekoliko primjera su primjena u izradi kalupa i zrakoplovnoj industriji, gdje su uklonjene velike količine materijala. Proces glodanja je najučinkovitiji, ako je volumen skidanja materijala što veći, a da se pritom zadrži visoka razina kvalitete. Najkritičnija ograničenja u produktivnosti strojne obrade i kvalitete dijela su pojava fenomena nestabilnosti zvanog regenerativno podrhtavanje. Podrhtavanje je samouzbudni fenomen koji se pojavljuje kod alatnih strojeva, u kojem proces rezanja utječe na smanjenje prigušenja konstrukcije stroja te završava nestabilnim ponašanjem. To rezultira jakim vibracijama alata uzrokujući lošiji rad[10]. Kako bi se poboljšala stabilnost procesa glodanja, tijekom nekoliko godina je razvijeno nekoliko metoda u vezi otkrivanja vibracija i podrhtavanja. Uporaba mikrofona i akcelerometara se uspješno primjenjuju u otkrivanju podrhtavanja u operacijama glodanja.

#### 6.1.2. Dinamometri

Dinamometar je mjerni instrument za mjerenje intenziteta (momenta) sile. Osnovni princip rada zasnovan je na promjeni dužine elastične opruge pri djelovanju sile. Za mjerenje sila rezanja tijekom procesa glodanja često se koriste dvije varijante dinamometara: pločasti dinamometri, koji se nalaze ispod izratka i rotirajući dinamometri, koji su smješteni između mehanizma stezanja alata i vretena. Prvo se signali senzora analiziraju za određivanje karakteristike senzora signala u stabilnom i nestabilnom slučajeva. Drugo, indikatori podrhtavanja i kritične vrijednosti su sastavljene i na kraju se uspoređuju karakteristike.

### **6.1.3. Akcelerometri**

Akcelerometar je uređaj koji mjeri pravilno ubrzanje uređaja. Akcelerometar prema tome mjeri težinu po jedinici mase, količinu poznatu još kao specifična sila ili G-sila. Većina akcelerometara ne prikazuju vrijednost koja se mjeri, ali očitavanja šalju na druge uređaje. Pravi akcelerometri također imaju praktična ograničenja u tome kako brzo reagiraju na promjene u ubrzanju, a ne mogu odgovoriti na promjene iznad određene frekvencije promjene.

Otkrivanje ubrzanja na temelju podrhtavanja se provodi pomoću akcelerometra. Karakteristike signala ubrzanja su slične signalima sile rezanja: signali su periodični u stabilnom i neperiodični u nestabilnim procesima obrade. Testirano je nekoliko senzora kao što su rotirajući dinamometri, akcelerometri, senzori akustične emisije (razine glasnoće) i elektroenergetski senzori. Senzori su uspoređivani u smislu točnosti i otpornosti na manja odstupanja. Najbolji rezultati su postignuti s multisenzorskim sustavom sastavljenog od senzora aksijalne sile i akcelerometara. Istraživanjima se zaključilo da mikrofoni, koji su smješteni u ambijent glodalice za snimanje idealne emisije buke, postigli najbolje rezultate u usporedbi s drugim sensorima.

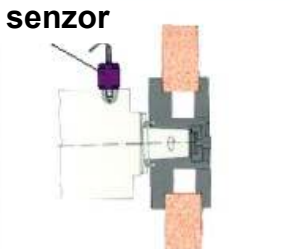
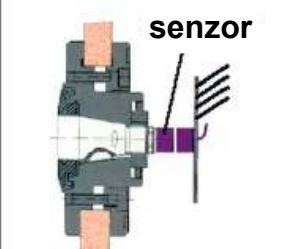
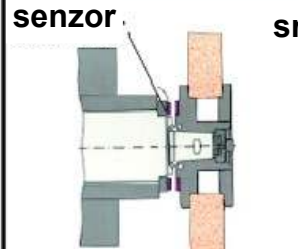
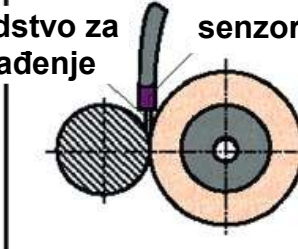
### **6.1.4. Mjerači pomicanja**

Druga metoda za mjerenje i identifikaciju podrhtavanja tijekom glodanja je temeljena na tom principu gdje se u prototipu sustava glodanja koristi laserski mjerač pomaka. Laserska zraka se usmjerava na rub rezne oštrce i reflektira. Snimaju se intenzitet i kut upada reflektirajuće laserske zrake i koriste za tumačenje nastalih vibracije i praćenje geometrije alata tijekom procesa glodanja.

## 6.2. Otkrivanje podrhtavanja u procesu brušenja

Postoji nekoliko načina za praćenje procesa te identifikaciju podrhtavanja tijekom procesa brušenja. Za mjerenje geometrije diska za brušenje, njegovog trošenja i profila površine koriste se triangulacijski laserski senzori, pneumatski, radarski i valni senzori. Druga mogućnost za praćenje i dijagnosticiranje procesa obrade je snimanje akustične emisije (AE) za vrijeme procesa brušenja. U tu svrhu se koriste senzori integrirani u disk za brušenje i senzori akustične emisije. Različiti AE senzori integrirani u kontrolnu petlju brusnih strojeva prikazani su na slici 6.1. Dvije automatske metode identifikacije podrhtavanja su sljedeći pokazatelji: entropija i „krupnozrnata“ učestalost informacija. Signali iz piezoelektričnih i senzora akustične emisije, koji snimaju normalnu snagu brušenja i akustičnu emisiju, su spremljeni za daljnje analize.

### Senzorski koncepti za akustičnu emisiju

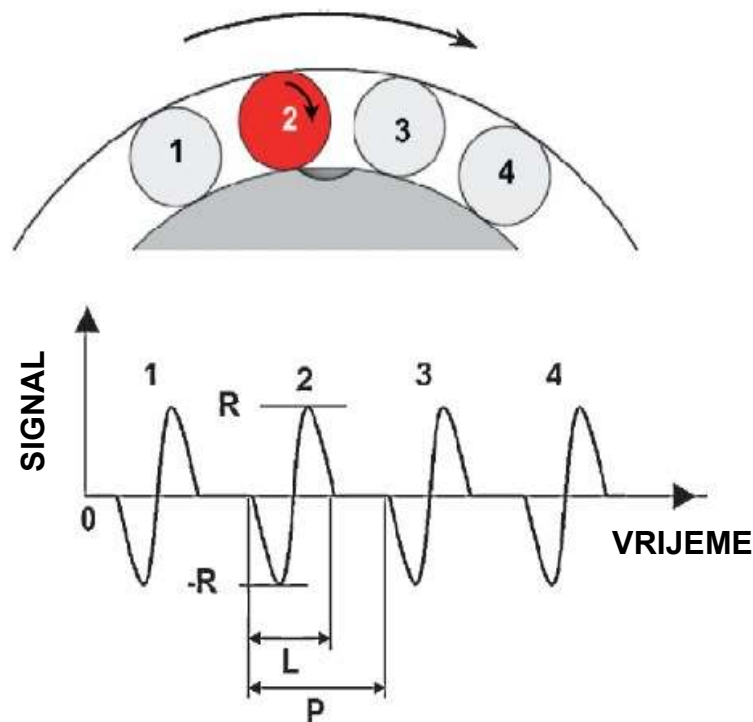
fiksno montirani senzor	bezkontaktni senzor	prstenasti senzor	senzor sredstva za hlađenje
 <p>senzor</p>	 <p>senzor</p>	 <p>senzor</p>	 <p>sredstvo za hlađenje      senzor</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ jednostavan za montažu</li> <li>⊕ spremanje signala prijenosa</li> <li>⊖ udaljenost od površine kontakta</li> <li>⊖ opasnost od smetnji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ udaljenost od površine kontakta</li> <li>⊕ spremanje signala prijenosa bez smetnji</li> <li>⊖ montaža</li> <li>⊖ podešavanje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ udaljenost od površine kontakta</li> <li>⊕ spremanje signala prijenosa</li> <li>⊕ nema smetnji</li> <li>⊖ montaža</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ kod površine kontakta</li> <li>⊕ bez smetnji</li> <li>⊕ montaža</li> <li>⊖ prijenos</li> <li>⊖ podešavanje</li> <li>⊖ nema kontrole brušnja površine brusa</li> </ul>

Slika 6.1. Senzorski koncepti za akustičnu emisiju [2]



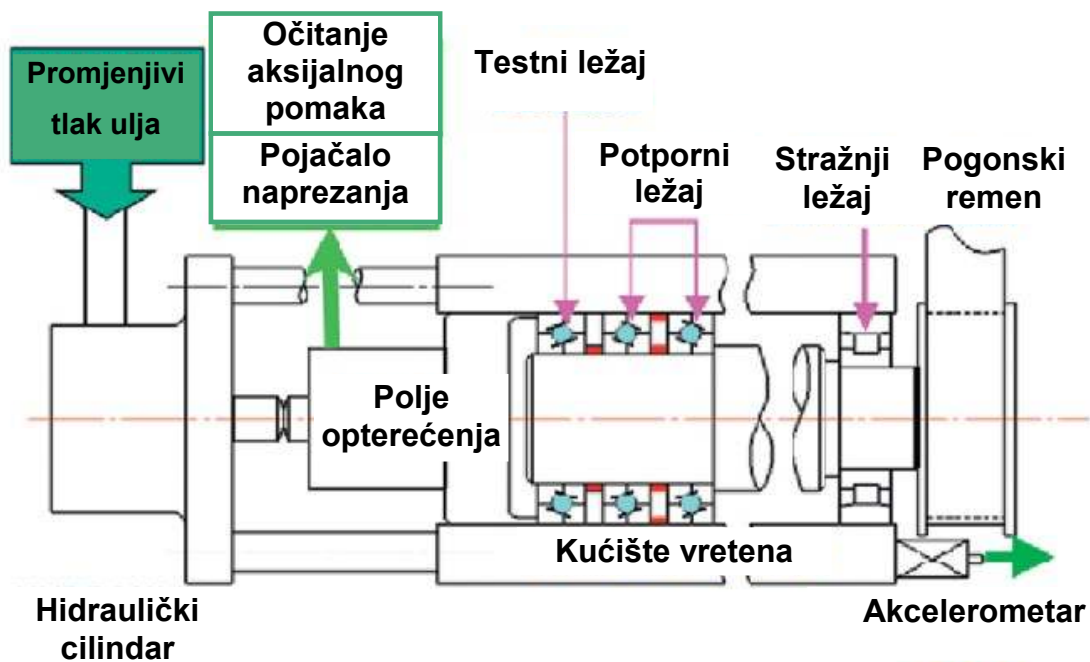
### 6.3. Preventivno otkrivanje oštećenja ležaja

Jedan od glavnih problema koji zaustavlja proizvodnu liniju je rani kvar ležajeva vretena. Karakteristično, to podrazumijeva visoke troškove popravaka i zastoje. Jednostavna i metoda niske cijene za predviđanje pravog vremena za zamjenu ležaja je praćenje geometrijske štete nastale na valjnim površinama kugličnih ležajeva. Potonuće u ili izvan šupljine stvara signal ubrzanja koji je analogan pulsirajućem sinusnom valu, prikazano na slici 6.2. Analiziraju se signali vibracija koje emitiraju valjna gibanja elemenata ležaja (vanjski i unutarnji prstenovi, kavez i kuglice). Za očitavanje navedenih signala ubrzanja na kućište vretena je priključen piezoelektrični akcelerometar.



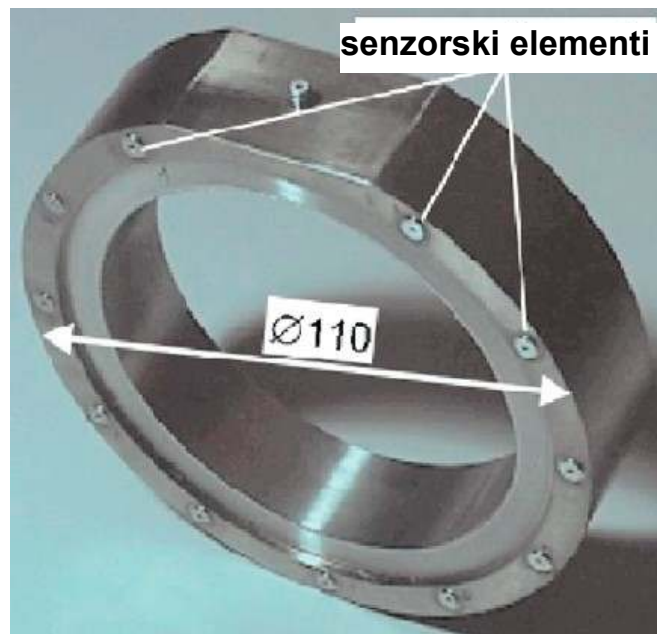
Slika 6.2. Signal ubrzanja (R-amplituda, L-vrijeme trajanja, P-vremenski period) [2]

Konstrukcija ispitnog uređaja prikazana je na slici 6.3. Nakon pretvaranja signal se prati procesorom predviđanja kvara. Ovaj procesor odašilje alarm predviđanja kvara kada je referentna vrijednost premašena. Uz mjerenje temperature vanjske staze ležaja, u vrijeme ubrzanja vretena, procijenjuje se stvarno stanje i starenje ležaja, kao i kontaminacija sredstva za podmazivanje.



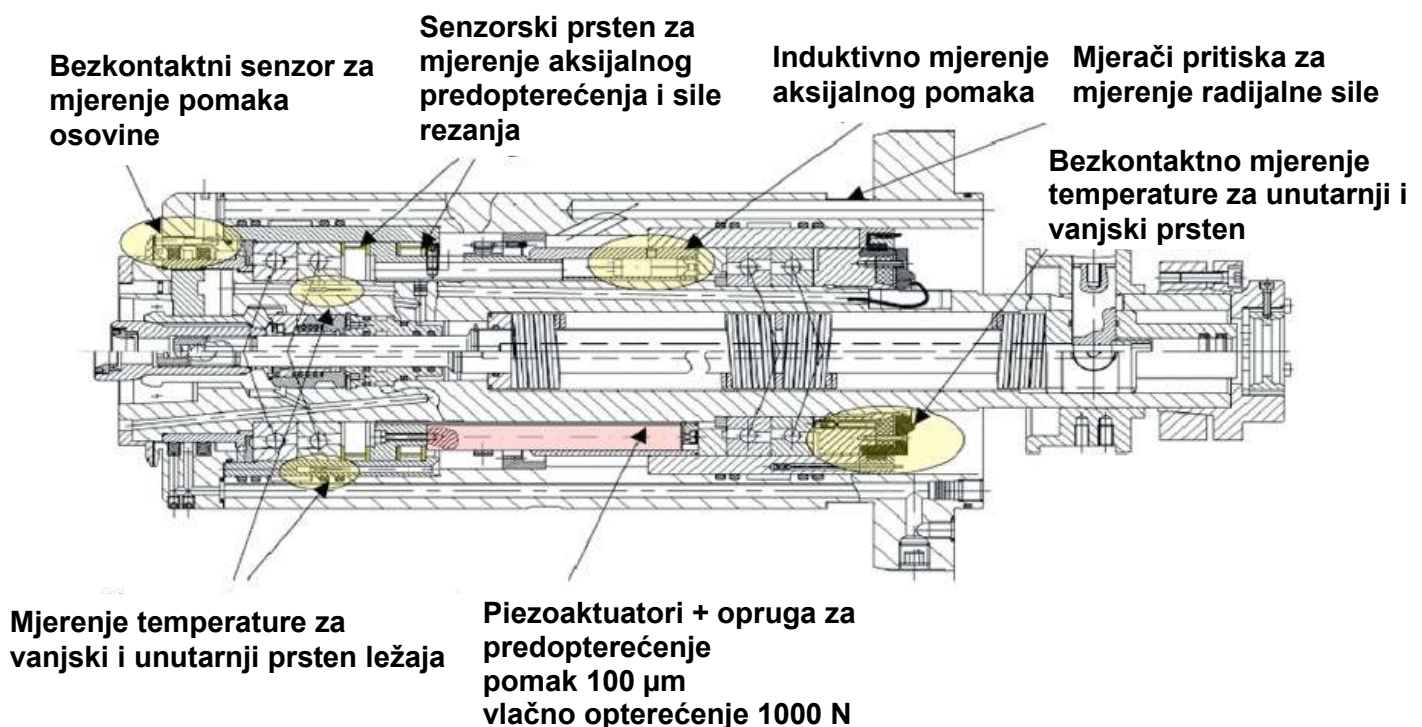
Slika 6.3. Shema ispitnog uređaja ležajeva [2]

Oštećenje valjnih površina ležaja se također može procijeniti. Za otkrivanje aksijalnih sila u fiksnom ležaju razvijen je poseban mjerni prsten. Ovaj mjerni prsten se sastoji od razmaknutih cjevčica opremljenih s elementima piezoelektričnih senzora sila koji su kružno razmiješteni na čelu, slika 6.4.



Slika 6.4. Mjerni prsten s piezoelektričnim sensorima sile [2]

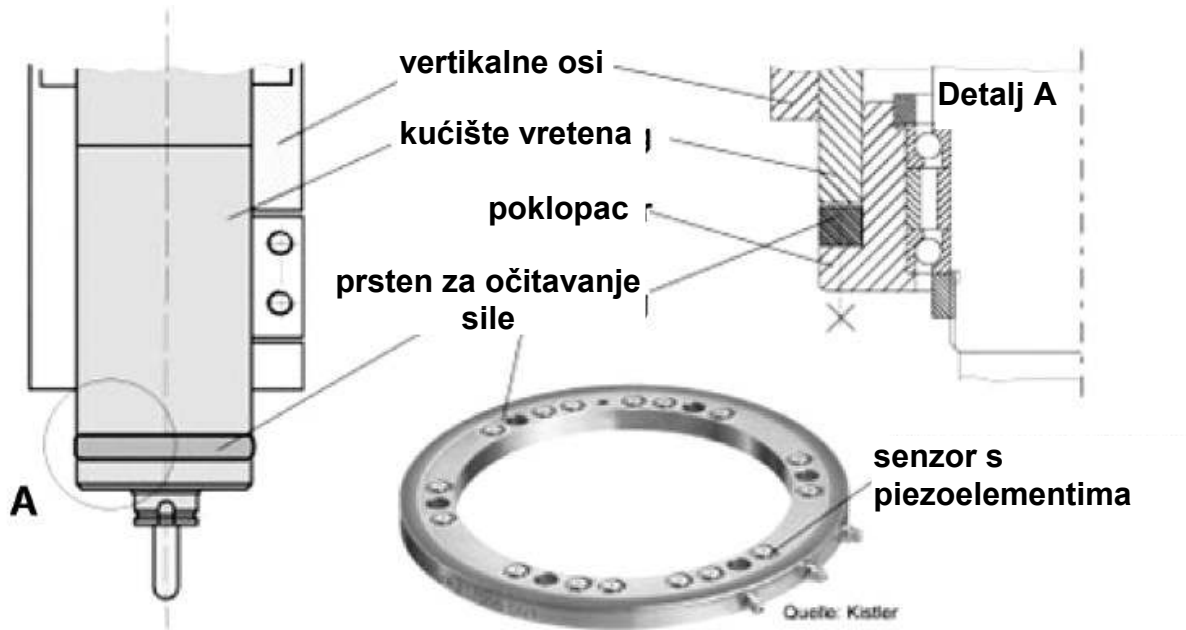
Ovaj uređaj daje informacije o aksijalnim silama rezanja, dinamičkim silama ležaja tijekom operacije i stvarnu silu preopterećenja tijekom procesa montaže. Mogu biti otkrivena i pretjerana opterećenja ležajeva koja uzrokuju uništenje. Rješenje može biti kompletirano pomoću prirubnog senzorskog prstena za mjerenje snage u tri smjera. Projekt „Intelligent Spindle Unit (ISPI)“ povezuje senzore za hlađenje ležaja, temperature statora, brzine vrtnje vretena i vanjskog opterećenja. CAD-model vretena je prikazan na slici 6.5. Mikrokontroler se koristi za procjenu senzorskih podataka. Uključuju se i senzori za detekciju temperature ležaja, vibracije i aksijalnog pomaka osovine i kontrolu promjene alata.



Slika 6.5. „Intelligent Spindle Unit“ s primjerom senzora i aktuatora [2]

#### 6.4. Sudari i lom alata

Sudari, frakture alata ili preopterećenja kod visokobrzinskih primjena mogu izazvati ozbiljnu štetu u današnjim visokobrzinskim obradnim centrima s visokim brzinama vrtnje. Za praćenje procesa obrade mogu se također koristiti senzorski prstenovi integrirani u vreteno. Za snimanje signala sile s minimalnim vremenom kašnjenja u kućište vretena je integriran piezoelektrični prsten za mjerenje sile, kao što je prikazano na slici 6.6.



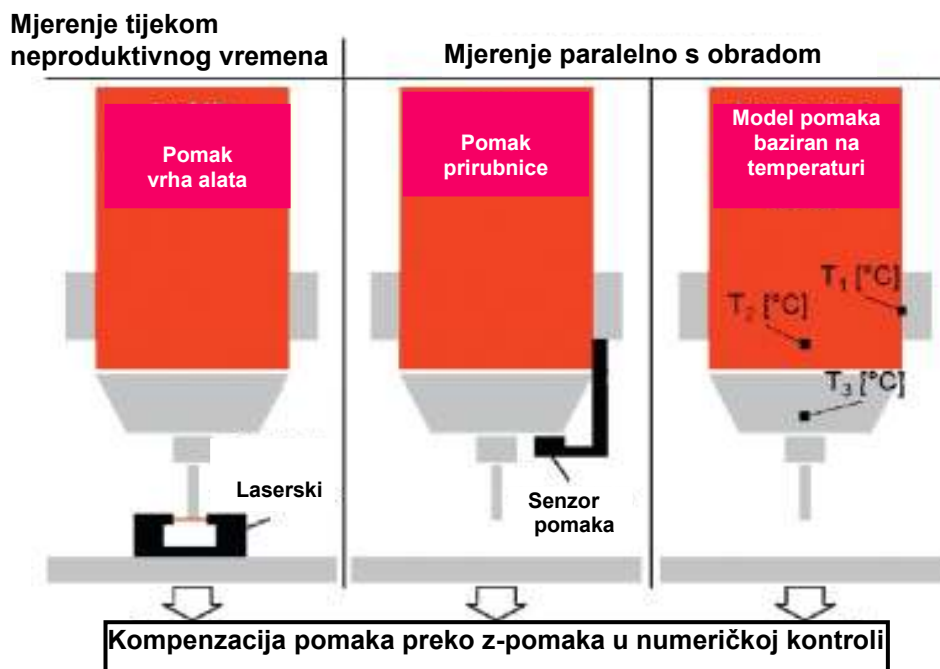
Slika 6.6. Instalacija mjernog prstena unutar vretena [2]

Tipično, strukturni dinamički modovi vretena smanjuju mjernu propusnost prstenova za mjerenje sile. U tu svrhu je razvijen Kalman filter, za kompenzaciju strukturnih modova, i značajno povećanje mjerne propusnosti senzora integriranih u vretena. Kao rezultat toga, dinamometri i integrirani senzori snage u vreteno se mogu koristiti za mjerenje sila glodanja pri visokim brzinama vrtnje. Za detekciju loma alata, u stol stroja je dodan senzor akustične emisije. Vrh amplitude u snimljenom signalu pokazuje lom alata. U tom okviru je prsten za očitavanje sila uspoređivan sa stolnim dinamometrom. Prsten se sastoji od osam jednoosnih piezoelektričnih senzora sila, smještenih u kružni okvir koristeći poseban epoksi materijal, za mjerenje aksijalnih i radijalnih komponenata sila. Rezultat toga je, da je prsten dobar jednako kao i stolni dinamometar.

Njegova upotreba se preporučuje ako se stolni dinamometar nemože primjeniti zbog veličine ili geometrije izradka. Razvijena su dva piezoelektrična prstena za očitavanje sila (senzorski prsten ležaja i prirubni senzorski prsten) i integrirana u izravano pogonjena motorvreteno za online praćenje procesa u procesu obrade. S ovom metodom moguće je otkriti sile procesa tijekom bušenja s promjerom alata manjim od 4 mm. Jedinica za bilježenje podataka integrirana u vreteno može se koristiti za identifikaciju i kako bi se izbjeglo brzo oštećenje vretena. Jedinica snima signale ubrzanja, temperature i senzora promjene alata. Spajanje uređaja preko serijskog porta na računalo dopušta čitanje i parametrizaciju bilježenih podataka. Ovaj jednostavan i siguran mjerni uređaj omogućuje otkrivanje nepravilnosti vretena za izbjegavanje ozbiljnih oštećenja. Snimaju se i radni sati u odnosu na brzinu vrtnje što je korisno za predviđanje intervala održavanja.

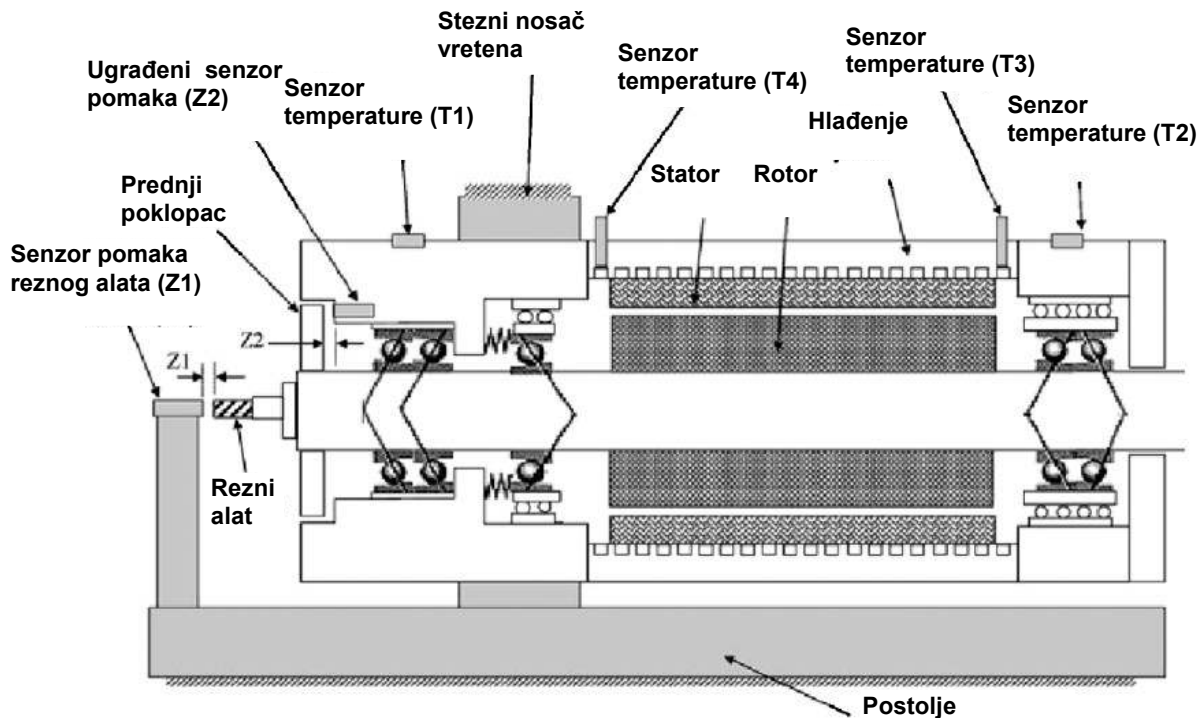
## 6.5. Aksijalni pomak

Aksijalni pomak vretena se sastoji se od brzine ovisne o aksijalnom pomaku ležajnih staza i termičke ekspanzije vretena. Pregled mjerenje aksijalnog pomaka dat je na slici 6.7.



Slika 6.7. Tri metode kompenzacije aksijalnog pomaka vretena [2]

U usporedbi s konvencionalnim vretenima, VBO vretena su predmet složenih dinamičkih i o brzinama ovisnih utjecaja. Razvijen je model toplinske pogreške koji pokazuje mehanički porast, a za utvrđivanje modela se koristi testni uređaj prikazan na slici 6.8. U blizini kućišta ležajeva i hlađenja je priključeno šest senzora za otkrivanje toplinskog širenja reznog alata.



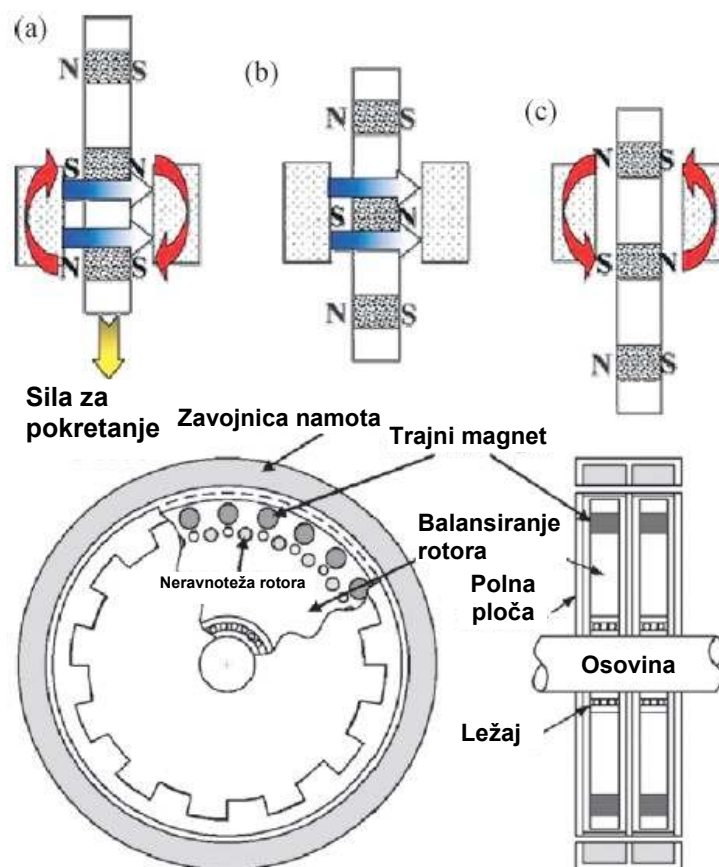
Slika 6.8. Postolje za testiranje i utvrđivanje toplinskog modela [2]

Koristi se i druga metoda za poboljšanje točnosti stroja u smislu kontrole temperature, gdje se temperatura i protok sredstva za hlađenja istovremeno prate i kontroliraju. U prednji dio vretena dodaje se i senzor za mjerenje aksijalnog pomaka osovine zvan „AMS“, Step-Tec AG. NU jedinica omogućuje kompenzaciju ovog aksijalnog proširenja. Za utvrđivanje toplinskog rasta vretena je uobičajena praksa mjerenje temperature ležaja i izvršenje potrebnih korelacija i ispravaka. Toplinsko širenje je samo dio problema. Za operacije s visokopreciznim vretenima, također je potrebno uključiti pomak ležaja uzrokovan brzinom kretanja za još preciznije predviđanje pomaka. Uređaj za mjerenje pomaka, razvijen od tvrtke Fischer, omogućuje mjerenje pomaka vretena u odnosu na kućište. Priključivanje posebnog senzora na prirubnicu alata omogućuje otkrivanje pomaka unutar 1mm točnosti. Izmjerena odstupanja se naknadno automatski prenose na CNC.

## 7. MEHATRONIČKI KONCEPTI

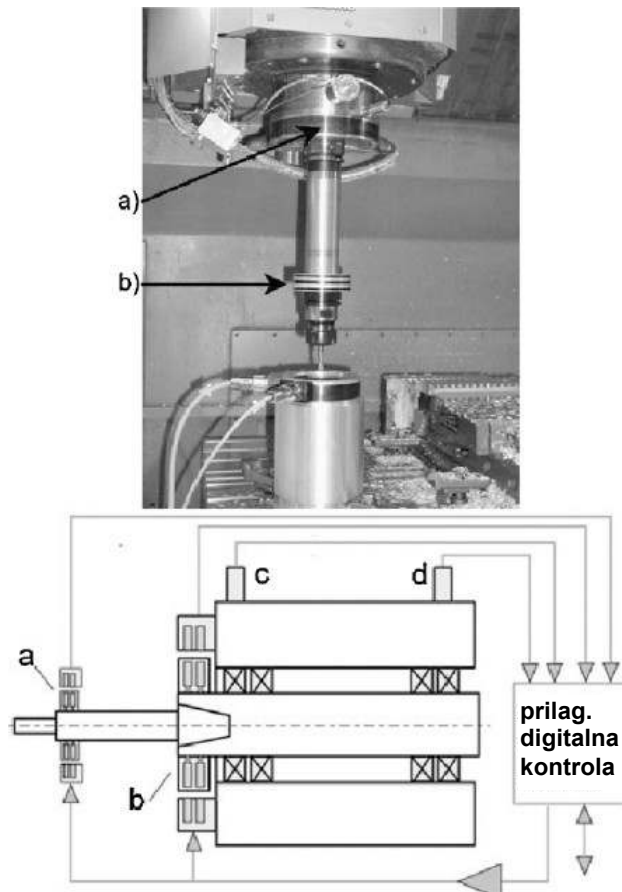
### 7.1. Aktivno balansiranje

Visokobrzinska vretena koja se koriste za glodanje ili brušenje zahtijevaju viši stupanj ravnoteže sustava vretena, posebice držača alata i samog reznog alata. Kao rezultat toga, može se primijetiti kvalitetniji i precizniji izradak i uočljiv je duži vijek trajanja strojnih komponenti. Za postizanje tih ciljeva potrebno je smanjiti vibracije uzrokovane neravnotežom. Kao dodatak „klasičnoj“ metodi balansiranja uklanjanjem ili dodavanjem mase u dvije ravnine, razvijeni su sustavi balansiranja integrirani u vreteno. Za smanjenje vibracija tijekom rada vretena koristi se aktivni program balansiranja, koji na temelju metode koeficijenta utjecaja izračunava optimalni položaj korekcijske mase. Također se može koristiti i aktivni uređaj za balansiranje. Slika 7.1. - dolje pokazuje shemu uređaja.



Slika 7.1. Gore: Načelo rotorskog mehanizma za aktivno balansiranje; Dolje: Shematski prikaz uređaja aktivnog balansiranja [2]

Program aktivnog balansiranja kontrolira uređaj mjerenjem veličine vibracija, faznog kuta, brzine vrtnje, položajem balansirajućeg rotora i izračunava prilagodbe za postavljanje korekcijske mase na odgovarajući način za balansiranje vretena tijekom operacije. Bez energije balansirajući rotor zadržava svoj položaj i kruži sa rotacijskom osi. Polna ploča rotira zajedno s rotacijskom osi i magnetizira površinu. Ona služi kao put za magnetski tok koji je stvoren zavojnicom. Princip rada uređaja je prikazan na slici 7.1.-gore. Uzbudna struja na zavojnici povećava magnetski tok u gornjem dijelu i smanjuje tok u donjem dijelu kao dobro. Rotor je pod utjecajem silazne sile normalno na magnetski tok (a). Pozicioniranje permanentnog magneta u sredinu polne ploče dovodi do najveće gustoće magnetskog toka i najmanjeg magnetskog otpora (b). Uklanjanje struje privremeno dovodi rotor nu sljedeći korak zbog inercije (c). Sustav dvostruke ravnine balansiranja prikazan je na slici 7.2.



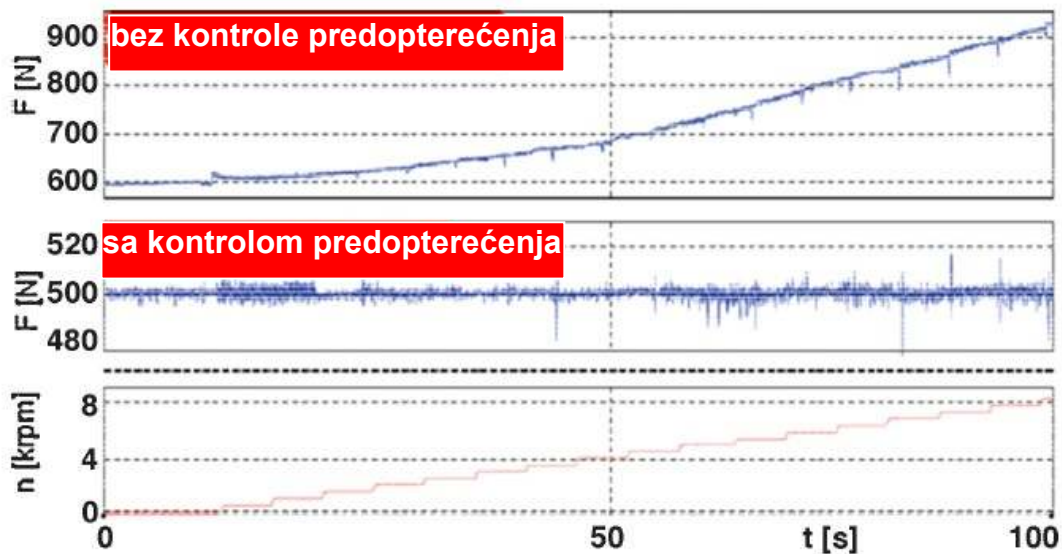
Slika 7.2. Gore: Sustav dvostruke ravnine balansiranja (a: balansirajući prsten na vretenu; b: senzori na statoru); Dolje: Shematski prikaz (a: balansirajući prsten; b: stator sa sensorima za brzinu i položaj; c i d: senzori vibracije) [2]



Za razliku od metode jedne ravnine balansiranja, ovaj sustav mjeri vibracije na vretenu u prednjoj i stražnjoj ravnini za balansiranje, stoga se vibracije mogu smanjiti još učinkovitije. Ovaj sustav aktivnog balansiranja može se koristiti za balansiranje vretena u vremenu izvođenja unutar nekoliko sekundi.

## 7.2. Aktivna kontrola predopterećenja

Predopterećenje ima širok utjecaj na vijek ležaja, ali i na dinamičko radijalno odstupanje, a time i utjecaj na kvalitetu površine. Prednaprezanje vretena kroz pasivne mehanizme je najviše konvencionalna metoda za predopterećenje ležajeva. Problem je to što se vretena ne mogu prilagoditi promijenjivim uvjetima. Kako bi se riješio ovaj problem razvijeno je test vreteno koristeći novi modul temeljen na piezoelektričnom pogonu. Pomoću vretena sa aktivnom kontrolom predopterećenja može se utvrditi optimalno predopterećenje za različite uvjete rada. Razvijen je kontrolirani mehanizam za podešavanje predopterećenja kako bi se postigla vrijednost predopterećenja predložena od strane proizvođača. Sastoji se od piezoelektrično temeljenog pogonskog modula s integriranim minijaturnim hidrauličnim prijenosom. U kombinaciji sa sensorima sila bit će dobiveno kontinuirano kontrolirano predopterećenje. Temperaturni senzori su također integrirani za neizravno otkrivanje generiranja topline u ležajevima. Za kompenzaciju toplinskog otklona predopterećenog vretena pogonski modul generira korelacijsku silu. U sklopu zajedničkog istraživačkog projekta „ISPI“, slika 6.5., piezoaktuator se koristi kako bi se postigla konstantna sila predopterećenja. Ovaj mehatronički koncept omogućava podešavanje predopterećenje ležaja za utvrđivanje optimalne radne točke, ako je vreteno preopterećeno. Slika 7.3. pokazuje izmjerene sile predopterećenja na različitim brzinama vrtnje sa i bez aktivne kontrole predopterećenja. Razvijen je i model predopterećenja da se opiše kako vanjsko hlađenje (ili grijanje) utječe na predopterećenje ležaja. Na temelju modela, predložena je shema aktivne toplinske regulacije predopterećenja i njezina izvedivost je potvrđena eksperimentalno. Predložena shema regulacije predopterećenja se postiže cirkuliranjem sredstva za hlađenje (ili grijanje) oko kućišta vretena za manipuliranje temperaturama kućišta i vanjskog prstena.



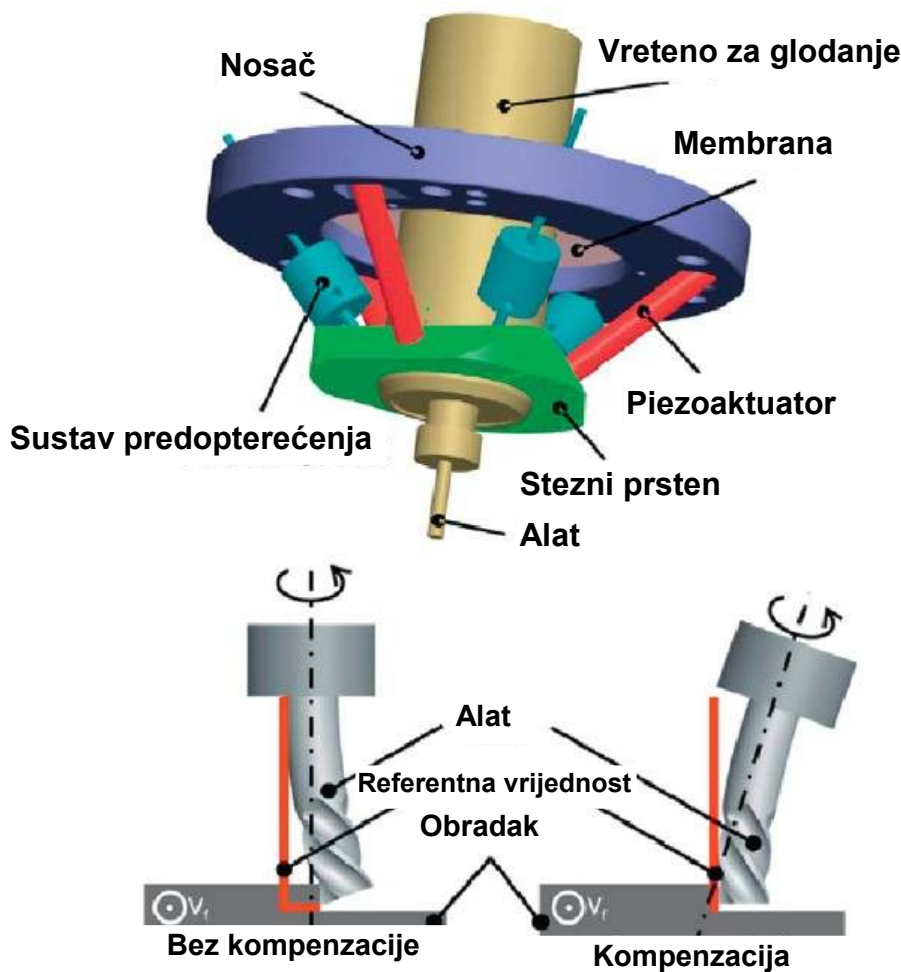
Slika 7.3. Brzina ovisna o sili predopterećenja bez i sa aktivnom kontrolom predopterećenja [2]

### 7.3. Aktivna kompenzacija otklona alata

Povećanje zahtjeva na produktivnost, a time i na povećanje posmaka, može izazvati nepoželjne progibe alata. Strojne operacije s dugim vitkim alatima su posebno pogođene. Izmišljen je mehanizam za višeosno pozicioniranje VBO vretena i ispravak otklona alata. Na slici 7.4. je prikazana shematska postavka eksperimentalnog modela koji se sastoji od sustava „adaptronic“ vretena koji radi s tri prednapregnuta piezoaktuatora. Procesne sile u x- i y-smjeru uzrokuju otklon alata, slika 7.4. - dolje. Statički dio ovih sila je ocjenjen srednjim vrijednostima dinamometrom izmjerenih sila procesa. U kombinaciji s krutošću alata, može se odrediti otklon alata. Koristeći inverznu kinematiku, željena pozicija se pretvara u poziciju pogona kako bi postigli željeni položaj vrha alata. Stvarni položaj se konstantno mjeri i korigira od strane zajedničke kontrole piezoaktuatora.

### 7.4. Kontrola prigušenja vibracija/podrhavanja

Pojava podrhavanja je posljedica nestabilne operacije rezanja. Podrhavanje kod alatnih strojeva može dovesti do loše obrađene površine, visokih opterećenja i oštećenja vretena, alata i obradka. Za sprečavanje tih neželjenih vibracija uvode se tri osnova pristupa: aktivan, poluaktivan i pasivan nadzor procesa.

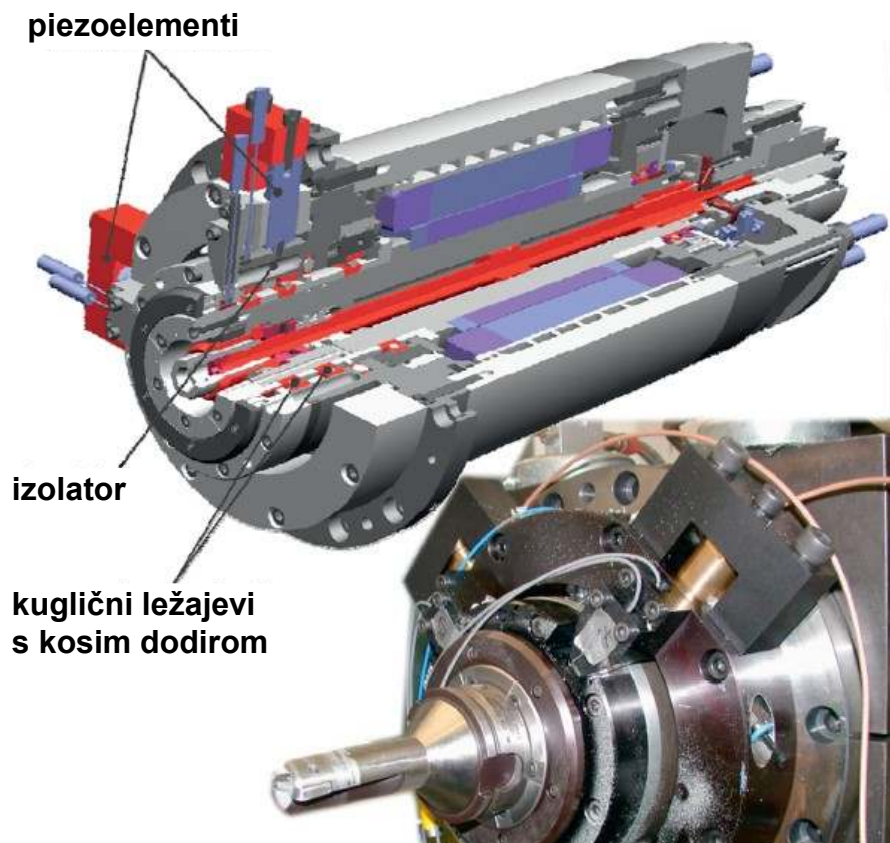


Slika 7.4. Aktivna kompenzacija otklona alata; Gore: Prototip; Dolje: Otklon alata [2]

#### 7.4.1. Aktivna kompenzacija

U okviru istraživačkog projekta „AdHyMo“ razvijeno je motorvreteno s hibridnim ležajevima. Uz konvencionalne kuglične ležajeve u VBO vretena je integriran aktivni magnetski ležaj (AML). AML je kontroliran zbog povećanja prigušenja vretena. Na temelju istraživanja razvijen je model za identifikacija dinamike sustava tijekom obrade. Razvijen je i prototip aktivnog vretena za glodanje. Tu su integrirani dodatni senzori i piezokeramički aktuatori za indukciju snage u zajedničkom vretenu za glodanje. Na vanjski ležajni prsten prednjeg ležaja priključena su dva piezokeramička pogona koji rade međusobno okomito. Sa ovom konstrukcijom je moguće primijeniti radialna opterećenja u rasponu od 1 kN. Pogoni su napajani od strane dva visokonaponska pojačala snage. Modifikacija prednjeg ležaja

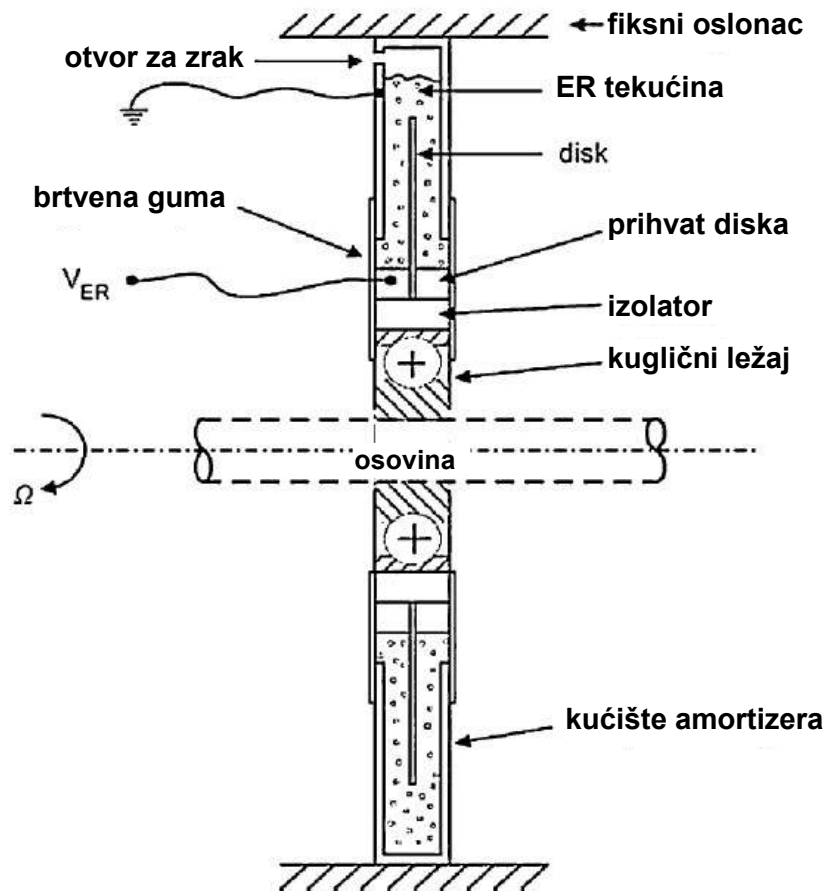
omogućava generiranje radijalnog pokreta. Prototip i strojni alat su prikazani na slici 7.5. Za vođenje aktuatora koristi se odgovarajući kontrolni program na način da se omogućuje dodatno prigušenje.



Slika 7.5. CAD model i prototip aktivnog vretena za glodanje s piezosnopovima [2]

#### 7.4.2. Poluaktivna kompenzacija

Poluaktivna metoda se temelji na upotrebi inteligentnog materijala- „Electrorheological (ER)“ tekućina. Medij je neprovodljivo ulje koje sadrži dielektrične čestice. Nakon izlaganja u električnom polju tekućina svoju fazu može odmah pretvoriti iz tekućeg u kruto. Osmišljen je kompaktni amortizer koji sadrži ER tekućinu, slika 7.6., a razvijen je i matematički model. Nadalje, razvija se i poluaktivni kontroler povratnih informacija na temelju umjetne inteligencije (AI).



Slika 7.6. Shema amortizera s ER tekućinom [2]

### 7.4.3. Pasivna kompenzacija

Za pasivnu kompenzaciju koristi se postupak postavljanje kotrljajućih ležajeva u dodatnu nerotacijsku hidrostatsku konfiguraciju. To vodi do poboljšanja prigušnih karakteristika vretena, što unapređuje dinamičko ponašanje vretena i sustava alata.

## 8. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme su brzina izrade, točnost i fleksibilnost obrade ključni faktori za povećanje produktivnosti i uspješnosti plasmana na svjetskom tržištu, u proizvodnoj grani koja se bavi obradom metala. Upravo ti faktori su utjecali na razvoj visokobrzinskih obrada, kod kojih se teži konstantnom povećanje brzina obrade i kvalitetnim reznim alatima koji će zadovoljiti takve uvjete rada. Ujedno se teži i pojednostavljenju te automatizaciji samih alatnih strojeva, što je rezultira svakodnevnim razvojem novih koncepata i modula strojeva.

U srcu svakog suvremenog alatnog stroja, glavna vretena jedinica je često zamišljena kao motorizirano vreteno. Ta komponenta snažno doprinosi produktivnosti, preciznosti i kvaliteti obrađenog proizvoda. Provedeni su brojni projekti kojima je cilj da se povećaju performanse, produktivnost i pouzdanost vretena. Razvijeni su mnogi koncepti za integraciju dodatnih senzora i aktuatora u vretene jedinice. Općenito, stanje u tehnici je poprilično napredovalo u odnosu na nedavnu prošlost. Danas motorvretena predstavljaju standard u modernoj gradnji alatnih strojeva, a suvremene izvedbe motorvretena u sebi sadrže više različitih sustava koji su važni i neophodni za njihovu brzu i učinkovitu primjenu.

Daljnji napredak alatnih strojeva u budućnosti će se izravno odnositi na tehnologije usavršavanja vretena. Suvremena tržišta još uvijek povlače brojne zahtjeve:

- povećanje okretnog momenta i brzine za primjene multifunkcionalne tehnologije (glodanje, brušenje i bušenje sa istim vretenom)
- minimiziranje potrošnje energije, uključujući perifernu opremu za pogon, ležajeve i hlađenje
- teškoobradljivi materijali zahtijevaju bolja rješenja.

Iz tih zahtjeva su izvedeni izazovi za buduća istraživanja. Na primjer, izazovi kod elemenata kotrljajućih ležajeva su kako ostvariti vrijednosti brzine od 3 000 000 mm / min sa „doživotnim“ podmazivanjem mašću. Predviđanje toplinskog širenja glavnog vretena i povezane promjene u strukturnom dinamičkom ponašanju tijekom operacija visokobrzinske obrade još treba riješiti sa zadovoljavajućom točnošću. Dakle, motorvretena su moduli suvremenih alatnih strojeva koji se još uvijek istražuju, moderniziraju i usavršavaju, a ovaj je rad prilog rješavanju te problematike.

## LITERATURA

- [1] <http://www.scribd.com/doc/56512667/High-Speed-Machining-Boticki-Brcic>, dostupno 05.07.2011.
- [2] E. Abele , Y. Altintas , C. Brecher , *Machine tool spindle units*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010), str. 781–802
- [3] [http://www.cyTECTsystems.de/cyTECTsystems/english/index.htm](http://www.cytectsystems.de/cyTECTsystems/english/index.htm), dostupno 05.07.2011.
- [4] <http://www.asiabearings.com/Angular-Contact-Ball-Bearings>, dostupno 05.07.2011.
- [5] <http://thrustbearingss.com>, dostupno 05.07.2011.
- [6] <http://www.fischerprecise.com/main/products/shaft-cooling>, dostupno 05.07.2011.
- [7] <http://www.cyTECTsystems.de/cyTECTsystems/english/produkte/cycool/images/mmks2.gif>, dostupno 05.07.2011.
- [8] <http://www.directindustry.com/prod/otto-suhner-ag/hsk-tool-holders-66196-487686.html>, dostupno 05.07.2011.
- [9] [www.hskworld.com](http://www.hskworld.com), dostupno 05.07.2011.
- [10] <http://www.jatit.org>, dostupno 05.07.2011.  
M.M. RAVIKUMAR, A.BHASKAR, *PREDICTION OF CHATTER IN MILLING*;  
Department of Mechanical Engineering, Pallavan College of Engineering,  
Thimmasamudram, Kanchipuram - 631502, Tamilnadu, India
- [11] <http://en.wikipedia.org>