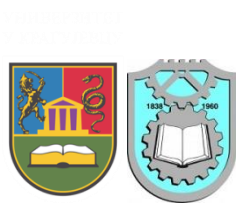


Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машине алатке

Број индекса: 54/2016

Тијана В. Николић

Мотор вретено – погонски елемент ЦНЦ машина **завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Тијана Николић**

Број индекса: **54/2016**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Мотор вретено - погонски елемент ЦНЦ машина**

Задатак: У оквиру завршног рада потребно је да кандидат прикупи и изврши систематизацију података о електричним вретенима - мотор вретенима, који се користе за погон ЦНЦ машина алатки. Потребно је извршити анализу неколико конструктивних решења ових вретана са детаљним описом карактеристика и начина примене.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Погони машина алатки,
3. Мотор вретено као погон ЦНЦ машина алатки,
4. Примери конструктивних решења мотор вретана,
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 13.05.2019.

Резиме:

У оквиру овог завршног рада прикупљена је и извршена систематизација података о електричним вретенима – мотор вретенима, који се користе за погон ЦНЦ машина алатки. Приказано је стање у технологији у погледу једног од важних модула алатног система – главне јединице вретена, са нагласком на моторизоване јединице вретена, а велике брзине и велике перформансе сечења. Информације о главним компонентама вретена дате су у погледу историјског развоја, структуре мотор вретена, тренутног стања технике, обима и подручја развоја. Приказано је хлађење мотора, лежајева и вратила, а приказани су и системи који се користе за пријем алата за сечење. Представљени су концепти интеграције сензора и актуатора (праћење процеса обраде, промене алата, хлађења и подмазивања, детекција вибрација и подрхтавања, мерење силе и померања) са циљем повећања продуктивности, поузданости и сигурности процеса обраде. На крају је извршена анализа неколико конструктивних решења ових вретена, са детаљним описом карактеристика и начина примене.

Кључне речи: мотор вретено, погон машина, ЦНЦ машине

Abstract:

Within this final paper, systematization of data on electric spindles – motor spindles, used to drive CNC machine tools, was collected and performed. The state of the art regarding one of the important modules of the tool system – the main spindle unit, with an emphasis on motorized spindle units, for high speeds and high cutting performance – is presented. Information on the main components of the spindle is given with respect to the historical development, the structure of the spindle motor, the current state of the art, the scope and scope of the development. The cooling of engines, bearings and shafts is shown, and the systems used to receive cutting tools are shown. The concepts of sensor and actuator integration (monitoring of the machining process, tool changes, cooling and lubrication, vibration and jitter detection, force and displacement measurement) are presented with the aim of increasing the productivity, reliability and safety of the machining process. Finally, several structural solutions to these spindles were analyzed, with a detailed description of the characteristics and methods of application.

Key words: spindle motor, drive machines, CNC machines

Садржај:

1. Увод	4
2. Погони машина алатки.....	8
2.1 Погон за главно кретање.....	9
2.1.1 Електрични мотори.....	10
2.1.2 Хидраулични мотори.....	12
2.1.3 Погон главног вретена.....	13
3. Мотор вретено као погон ЦНЦ машина алатки.....	17
3.1 ЦНЦ машине.....	17
3.2 Развој мотор вретена.....	19
3.3 Погон мотор вретена.....	20
3.4 Хлађење мотора.....	23
4. Примери конструктивних решења мотор вретена.....	25
5. Закључак.....	36
6. Литература.....	37

1. Увод

Способност да се компоненте машински обрађују у најкраћем могућем року је питање које је данас од великог значаја. Због тога, свако побољшање или метода која ће омогућити брже испоруке уз истовремено повећање квалитета израде, мора се узети у обзир приликом дизајнирања алата за обраду лима, алата за ливење и слично. Један од начина је употреба стратегије високобрзинске обраде - *VBO* или уобичајеног енглеског назива *High Speed Machining* - *HSM*. Иначе, не постоји јединствена дефиниција која би тачно описала *VBO* стратегију у машинској обради, али то може бити било који процес на *NU* глодалици који користи већу брзину вретена, веће премештање и бољу технологију обраде, а све у сврху повећане продуктивности и брже производње него што се то може постићи конвенционалним или претходно развијеним процесима обраде. Савремена технологија у процесима обраде који су се до данас развијали омогућила је оператерима машина да приступе свом послу на потпуно другачији начин. Специјални алати за резање развијени за *VBO* стратегију имају потпуно различите карактеристике резања од претходних алата за резање. *VBO* стратегија користи разне напредне технологије обраде као што су:

- Мала дубина резања
- Велика запремина
- Велике брзине ротације (веће од 12000 min^{-1})

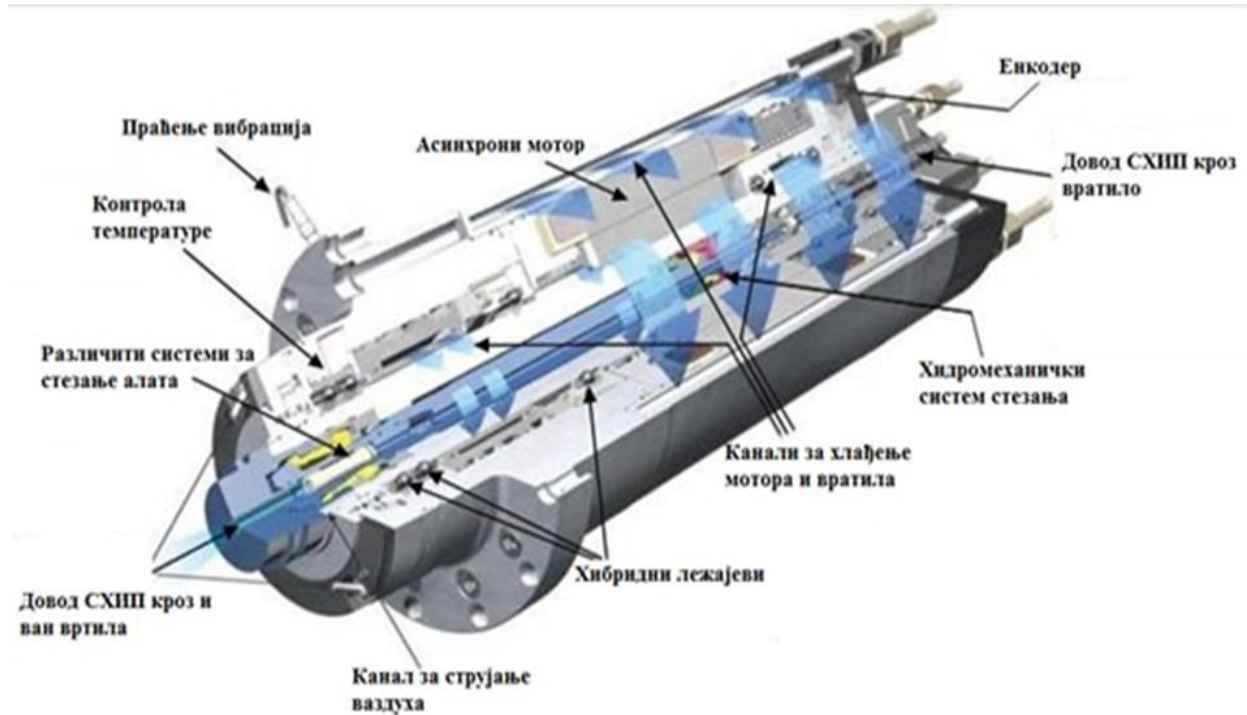
Код *VB* обраде, главно вретено је најважнији део алатног система и од њега зависи каква ће бити обрада, а најкритичнији делови су лежајеви. То се мора узети у обзир приликом димензионисања и конструкције главног вретена, јер мора бити конструисано да издржи велике брзине ротације, а истовремено преноси довољно велику снагу и обртни момент, без преоптерећења и што је дуже могуће. Лежајеви који се могу користити са алатним алатима намењеним *VB* машини су котрљајући куглични, котрљајући цилиндрични, хидростатичких или магнетних лежајева, а најпопуларније решење за таква вретена су куглични лежајеви са косим додиром.

Данас је велика већина машинских алата опремљена моторизованим вretenом. За разлику од вретена са спољним погоном, моторизована вретена не захтевају механичке преносне елементе попут зупчаника и спојница. Моторно вретено углавном се састоји од елемената приказаних на слици 1.1[1].

Вретена имају најмање два сета, углавном системе кугличног лежаја. Систем лежаја је компонента са највећим утицај на животни век вретена. Најчешће је мотор распоређен између два система лежајева.

Због високог односа 'снаге и запремине' често се тражи активно хлађење, које се углавном спроводи хлађењем на бази воде. Расхладна течност тече кроз расхладни омотач

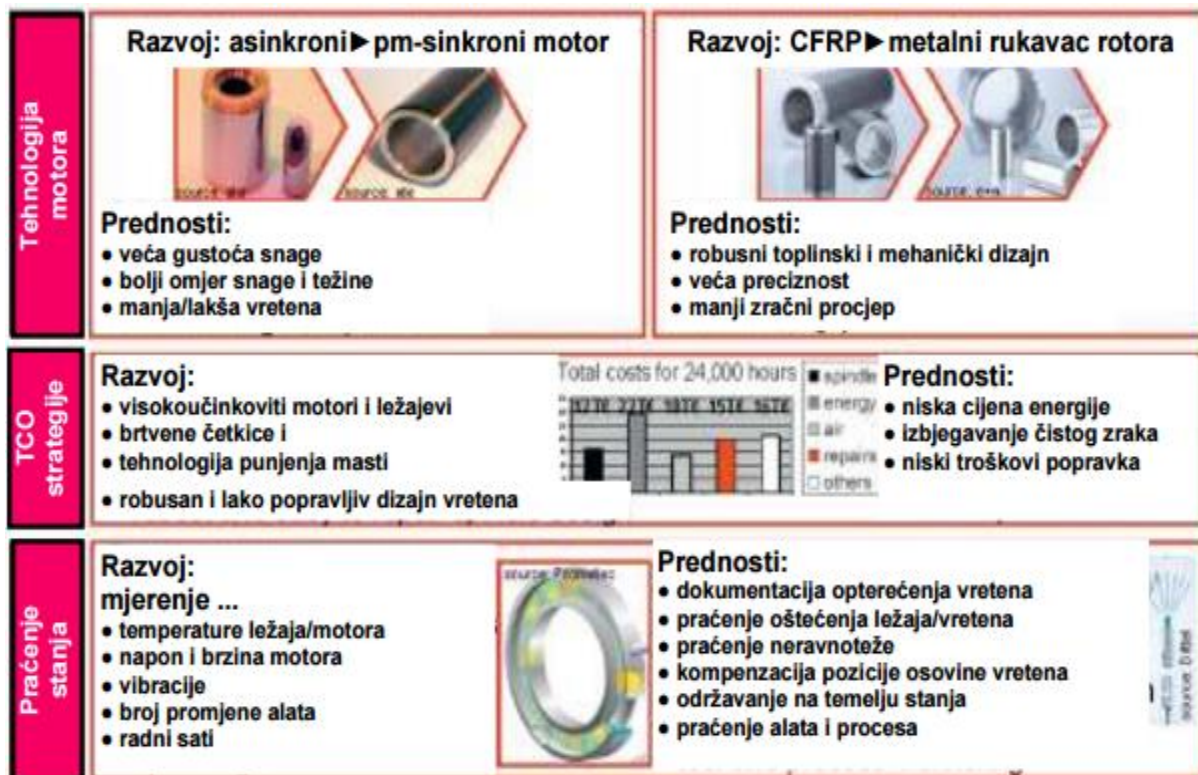
око статора мотора. Заптивке на крају алата на вретену спречавају продирање струготине и течности за хлађење и подмазивање. Често се хлађење ради са прочишћавајућим ваздухом и лавиринтним заптивачем.



Слика 1.1 Пресек мотор вретена[1]

Стандардизовани интерфејс алата као што су HSK и SK је постављен на предњем крају вретена. Систем за стезање се користи за брзе аутоматске промене алата. У идеалном случају, за поуздану обраду, потребна је јединица за стезање (вучна) која такође може надгледати силу стезања. Ако се течност за сечење мора пренети кроз алат до секача, адекватни канали и ротациона спојница постају потребне карактеристике система стезања. Данас је скоро свако вретено опремљено сензорима за надгледање температуре мотора (термистори или термопарови) и положаја стезног система. Додатни сензори за надгледање лежајева, погона и стабилности процеса могу се прикључити, али нису уобичајени у многим индустријским применама.

Тренутни развој индустријске примене мотор вретена усмерен је на моторну технологију, побољшавајући укупне трошкове власништва (ТСО) и надгледање стања ради предвиђања (слика 1.2).



Слика 1.2 Главни трендови у индустрији на развоју вретена[1]

Друго централно питање је развој погонских система који неутралишу постојећа ограничења снаге и излазне фреквенције, смањујући истовремено загревање осовине вретена.

Посебна пажња посвећена је повећању поуздано достигнуте брзине ротације у прошлости. Међутим, фокус се променио у већи обртни момент при брзинама до 15.000 о/мин. Због повећаних захтева за поузданошћу, животним циклусом и предвидљивим одржавањем, системи за праћење стања у моторним вретенима постали су важнији.

Периодично и/или континуирано проматрање параметара статуса вретена омогућава откривање хабања, прегрејавања и непосредних кварова.

Разумевање трошкова животног циклуса (LCC) вретена је непрестано добијало на важности у предвиђању њиховог сервисног периода уз трошкове одржавања, квара и оперативних трошкова.

У оквиру овог завршног рада у другом поглављу је приказан погон ЦНЦ машина алатки. Такође, у другом поглављу је описан погон за главно кретање. Описани су и електрични мотори, хидраулични мотори и погон главног вретена, који спадају у погон за главно кретање.

У трећем поглављу, на почетку је описан развој ЦНЦ машина. Даље, детаљно је дат приказ развоја мотор вретена, као и његов погон код ЦНЦ машина. На крају је поменуто хлађење мотора и лежајева.

У четвртом поглављу дати су примери неких конструктивних решења мотор вретена. Приказано је неколико примера мотор вретена различитих фирми, са својим карактеристикама. Од неких примера је приказан и пресек, на коме се јасно могу видети делови који га чине.

На крају је дат закључак и литература.

2. Погони машина алатки

Погонски системи нумерички управљаних алатних машина имају задатак да извршавају наредбе примљене од управљачке јединице. Погонски системи управљају извршним органима машине одговарајућим брзинама, правилним путевима, у складу са програмом, воде се и доводе додељене позиције. Погонски системи су, дакле, кључне компоненте алата. Машине и читав низ излазних параметара процеса обраде зависе од њих. Генерално, погонски системи нумерички управљаних алатних машина подељени су на погонске системе за главно кретање, помоћно кретање и помоћне функције, слика 2.1. У погледу погонских система, главна разлика између конвенционално и нумерички управљаних алатних машина је чињеница да ове друге имају одвојене погонске системе за главно и за помоћно кретање. Ова разлика је логична и произилази из карактера нумеричке контроле. [2]



Слика 2.1 Подела погонских система[2]

Концепт и техничка решења погонских система непрестано се мењају и побољшавају. У последњих четрдесет година ови системи су унапређени и заправо промењени, од асинхроних нерегулисаних, погона са степенастом променом преносног односа преносника и класичних екстерних погонских система (систем: погонска јединица - преносник - главно вретено), до нових решења, као што су уградни електромотор и прецизна мотор вретена. Развој погонских система са директним погоном све се више истискује из употребе класичних погона, где се пренос са електромотора на главно вретено машине, врши одговарајућим преносницима (зупчаници, каишеви итд.).

Погонски системи за нумерички управљане алатне машине треба да омогућавају:

- миран старт (без трзаја), промена правца и заустављање,
- линеарну зависност између улазног и излазног сигнала,
- висок одзив на управљачке сигнале.

Поред тога, ови системи захтевају висок степен искоришћења, мале габаритне мере и поузданост у раду.

Параметри за избор погонских система код нумерички управљане алатне машине су:

- потребна снага (потребна снага за процес резања),
- расположива снага,
- динамичке карактеристике погонског система,
- обртни момент (за главна вретена).

2.1 Погон за главно кретање

Како је брзина резања (v) технолошки најзначајнији параметар, одржање њене константне вредности за различите окрете предмета обраде (окретања) могуће је постићи једино променом броја обртаја (n) електромотора.

$$v = \frac{d\pi n}{1000} (\text{m/min})$$

Нпр. зависно од врсте алатне машине постоје следећи заједнички односи max. и min. Броја обртаја:

- струг: од 40:1 до 60:1
- глодалица: од 30:1 до 50:1
- обрадни центар: 50:1 до 70:1

Електромотор је неопходан елемент сваке алатне машине и користи се за директан погон радног вретена (алата, предмета обраде) или посредан преко механичких и хидрауличних

елемената како би се преносио обртни момент и на тај начин постигао задати параметар обраде.

При избору електромотора важне су следеће карактеристике:

- снага P , kW
- момент M , Nm
- број обртаја n , 1/min
- степен искоришћења
- рад при константном оптерећењу
- димензије, итд.

2.1.1 Електрични мотори

Основна подела електромотора према типу струје:

- Једносмерни (*DC -direct current*)
- Наизменични (*AC -alternating current*)
 - синхрони
 - асинхрони

На слици 2.2 су дате предности *DC* и *AC* мотора.

ПРЕДНОСТИ – DC	ПРЕДНОСТИ – AC
велико подручје промене броја обртаја	нема делова који се троше
једноставније управљање	ефикасније хлађење и одржавање
релативно мања цена	повећање момента и снаге код истих димензија и тежине

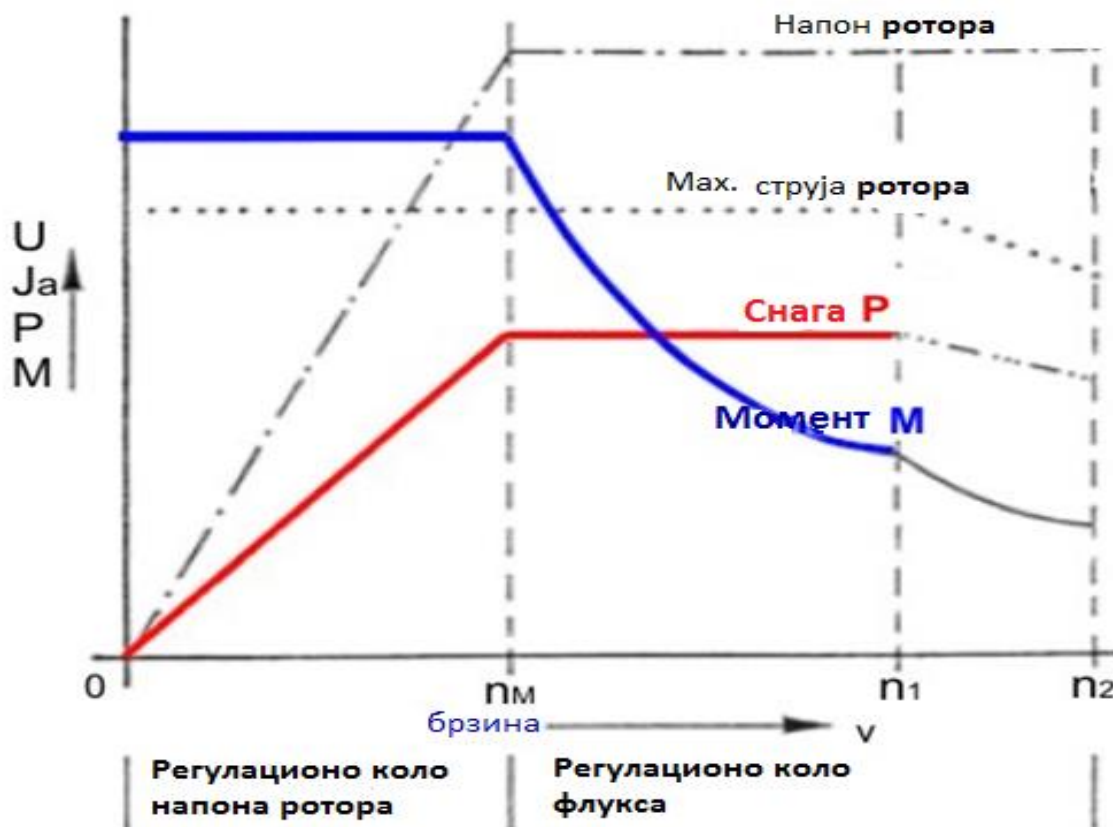
Слика 2.2.Предности *DC* и *AC* мотора

Једносмерни електромотори – DC

Потреба за континуираним регулисањем броја обртаја код NC алатних машина довела је до употребе мотора са једносмерном струјом (*DC* мотори) са регулацијом брзине. До недавно су ови мотори имали значајно место код NC алатних машина, али сада су углавном замењени асинхроним електромотором (*AC* мотори).

Снага мотора (P) је производ обртног момента (M) и броја обртаја (n) и линеарно расте са повећањем напона ротора. Након достизања називног напона ротора број обртаја мотора може се повећати мењајући магнетни ток, а да при томе снага остане константна уз смањење момента ротора.

Промена правца се врши променом правац струје у колу ротора. На слици 2.3 може се видети дијаграм карактеристика једносмерног мотора.



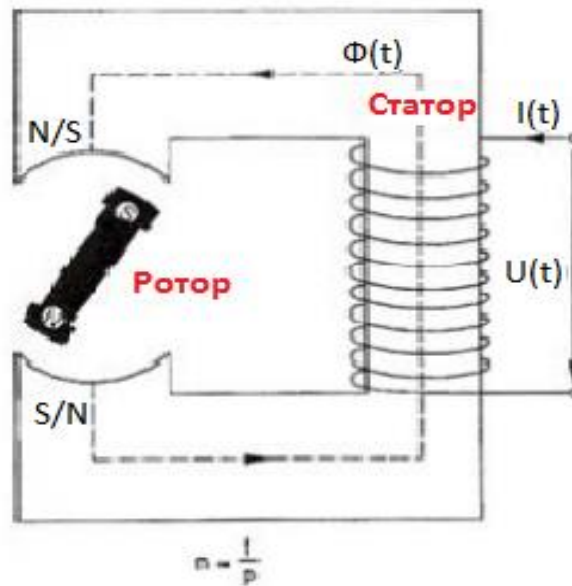
Слика 2.3 Дијаграм карактеристика једносмерног мотора[2]

Наизменични електромотори-АС

Синхрони електромотор (синхроно је када је механичка брзина ротације тачно једнака брзини ротације његовог ротирајућег магнетног поља) за разлику од једносмерне струје поседује стални магнетни ротор који тежи ка константном магнетном пољу у ротору. За разлику од DC-а код мотора са наизменичним мотором промена броја обртаја се остварује променом мрежне фреквенције (50Hz) за шта се користе фреквентни претварачи или фреквентни регулатори.

Асинхрони електромотор има исти статор као и синхрони, али ротор има трофазно напајање. Мењање броја обртаја као и на синхронном мотору се врши помоћу фреквентних претварача.

Одлука синхрона или асинхрона зависи од цене и врсте примене. За мале до средње снаге се препоручује асинхрони (једноставнија конструкција), а истовремено за скупље перформансе такође требају додатни уређај. На слици 2.4 приказана је шема електромотора наизменичне струје.



Слика 2.4 Електромотор наизменичне струје[2]

2.1.2 Хидраулични мотор

На појединим алатним машинама се може користити хидраулични погон (хидраулична пумпа и хидраулични мотор) где је потребна стална промена броја обртаја. Код ових мотора, електрична енергија преко електромотора се помоћу хидрауличне пумпе у хидромотору претвара у енергију флуида која покреће преноснике за главно или помоћно кретање (обртно кретање алата или радног комада).

Подела хидрауличних мотора по конструкцији може бити на:

1. ХИДРОМОТОРЕ СА КРИЛНИМ СЕГМЕНТИМА
 - унутрашњом циркулациом
 - спољашњом циркулациом
2. ХИДРОМОТОРЕ СА КЛИПНИМ ЈЕДИНИЦАМА
 - радијални клипни и
 - аксијални клипни.

Код хидромотора са крилним сегментима променом ексцентричности на ротору пумпе и хидромотора омогућена је непрестана промена броја обртаја.

Код хидромотора са клипним јединицама разликују се хидромотори са сталним протоком и хидромотори са променљивим протоком.

На слици 2.5 дате су предности и недостаци хидромотора.

ПРЕДНОСТИ	НЕДОСТАЦИ
• континуирана промена броја обртаја	• потребно је квалитетно заптивање
• миран рад	• квалитетно уље (вискозност)
• системи су стандардизовани (лака замена)	• могућност продирања ваздуха у систем
• сигурносни вентили (осигурање од преоптерећења)	• висока тачност обраде свих делова

Слика 2.5 Предности и недостаци хидромотора.

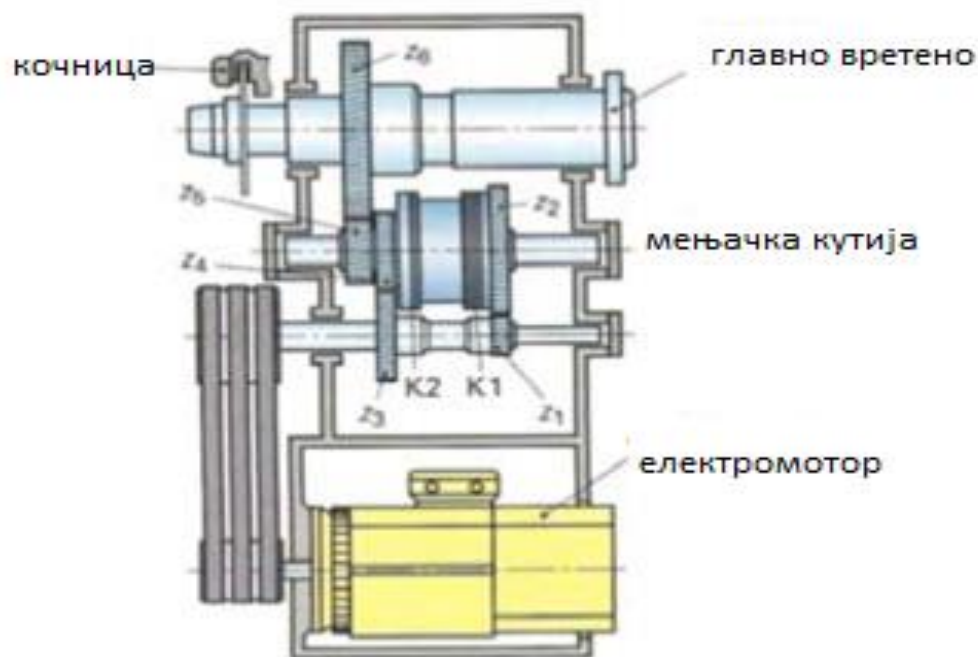
2.1.3 Погон главног вретена

За погон главног вретена код **класичних алатних машина** (најчешће универзалних машина алатки) са спољним погоном, обртни момент од погонског електромотора до главног вретена иде преко каишног или зупчастог преносника.

За регулацију броја обртаја главног вретена користе се различити парови зупчаника чијим међусобним комбинацијама на излазу главног вретена се добија ступњевита промена (најчешће 8, 12 или 16) броја обртаја (нпр. геометријска промена: 450, 560, 710, 900, 1120, 1400,...). На слици 2.6 је приказан пример класичног погона главног вретена применом зупчастог преносника [2].

Овакав начин регулације броја обртаја главног вретена данас је избачен из употребе, јер је имао низ недостатака:

1. масивна и некомпактна конструкција
2. ступњевита промена броја обртаја
3. немогућност прецизне регулације кретања
4. велика бука и
5. губици у преносу.

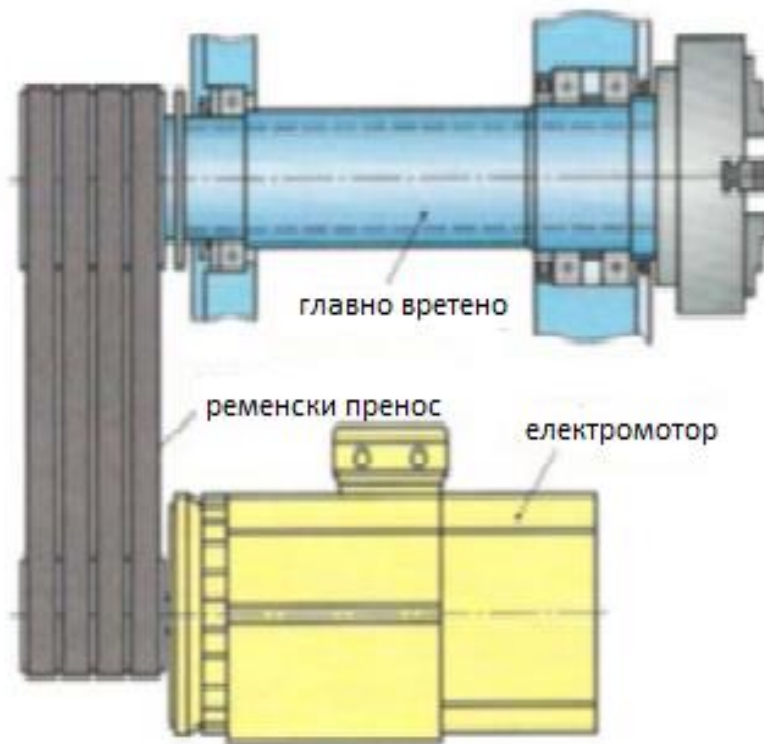


Слика 2.6 Класичан погон главног вретена преко зупчастог преносника[2]

Наведени недостаци класичног погона са спољним погоном и немогућност његове примене у савременим процесима обраде довели су до развоја **директног погона** главног вретена који је у општој употреби данас. Компактну форму директног погона главног вретена карактерише низ предности:

1. континуална промена броја обртаја (било који број обртаја између n_{min} и n_{max}),
2. компактна конструкција машине (уштеда на простору),
3. краће време покретања и заустављања вретена машине,
4. повећана продуктивност, квалитет и тачност обраде,
5. мања бука и вибрације и
6. већи степен искоришћења (нема губитака у преносу код каишних и зупчастих преносника)

Регулација броја обртаја главног вретена постиже се променом фреквенције и напона напајања асинхроног мотора који је преко зупчасте спојнице везан са главним вретеном. На слици 2.7 приказан је пример директног погона главног вретена.



Слика 2.7 Директан погон главног вретена[2]

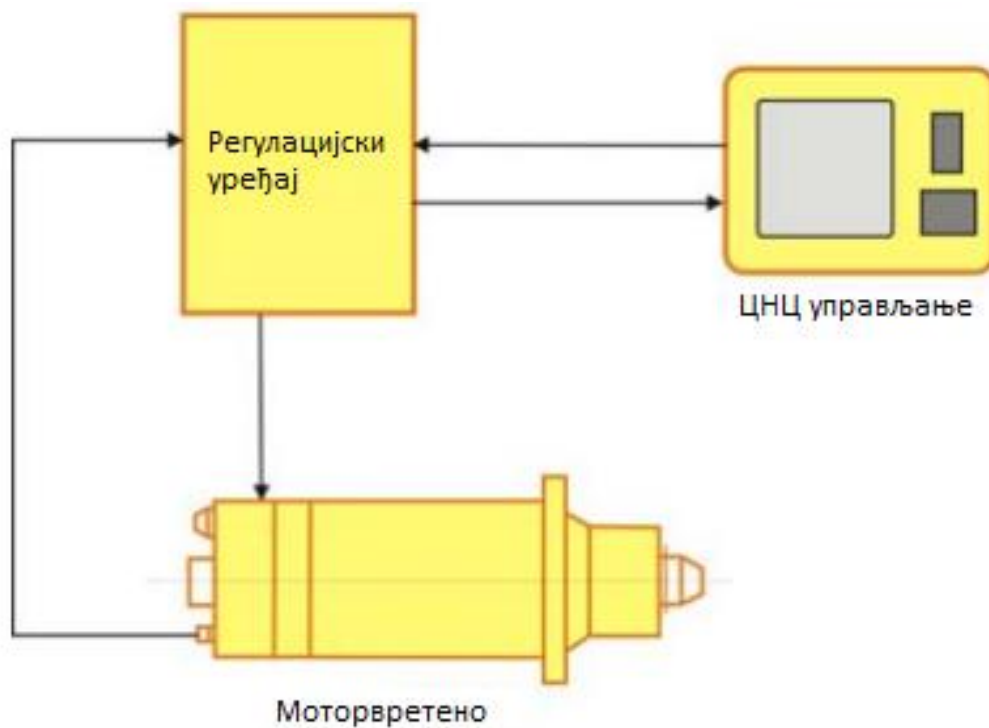
Мотор вретено

За потребе високобрзинске обраде - VBO, претходних година примењује се погон код кога је извршено интегрисање главног вретена и електромотора у ткз. мотор-вретено. То је уствари електромотор чије је вретено уједно и главно вретено. Број обртаја мотор-вретена достиже до чак 100000 о/мин. Код овог система посебна пажња је усмерена на топлотну изолацију вретеништа, због чега се електромотор хлади помоћу течности (воде или друге течности).

Због сложености израде, мотор-вретана се обично пројектују посебно за сваку намену у складу са захтевом корисника, односно за специфичну употребу. Због своје сложености, посебна пажња се поред топлотне равнотеже посвећује избору и подмазивању лежајева. Иако имају веће трошкове од директног погона и потребу за топлотном изолацијом мотор-вретена имају низ предности као што су:

- велики број обртаја (краће време израде дела на машини са овим системом) са минималним вибрацијама,
- већи квалитет и тачност израде дела,
- представљају интегрисано решење (могућа модулarna конструкција алатни машина)

Ове предности су довеле до интензивирања употребе мотор-вретена. На слици 2.8 приказан је пример примене мотор-вретена.



Слика 2.8 Приказ погона помоћу мотор-вретена [2]

3.МОТОР-ВРЕТЕНО КАО ПОГОН ЦНЦ МАШИНА АЛАТКИ

3.1 ЦНЦ машине

Данас је индустрија машина незамислива без савремених CNC (*Computer Numerical Control*) машина. CNC машине имају скоро исте делове као и класичне машине са ручним управљањем. Суштинска разлика је додавање управљачке (CNC) јединице и серво мотора за погон главног вретена и мотора за погон сваког појединачног помоћног кретања.

Управљачка јединица CNC машине израчунава релативне координате где треба да буду алат и радни предмет и управља серво моторима који врше кретање алата или радног комада. Генерално, већина произвођача CNC машина користи управљачке јединице од најпознатијих произвођача и уграђује их у своје машине. Најпознатије и најраширеније примењене управљачке јединице су: Fanuc из Јапана, Siemens и Heidenhein из Немачке и др. Најпознатији произвођачи CNC машина су такође компаније из Немачке и Јапана.

У индустријској пракси се примењују следеће методе програмирања: ручно програмирање, полуаутоматско програмирање (погон) и аутоматизовано (рачунарско) програмирање.

Скуп свих потребних упутстава прикупљених у једној датотеци на основу којих машина извршава обраду дела назива се NC програм, CNC програм или подпрограм. Програм је детаљан скуп упутстава, наредби (корак по корак) које се односе на дефинисање релативног положаја резног алата у односу на радни сто на машине на којем је предмет обраде позициониран и стегнут.

CNC машине су еволуирале из NC машина (нумерички управљане машине) где се информације нису чувале као цели програми у управљању машином, већ су делимично учитаване са бушене траке. Развој CNC технологије почео је средином 1970-их. То је омогућило рационализацију у масовној и појединачној производњи, уз знатно брже и прецизније кретање алата.

Данас је машинска индустрија готово незамислива без савремених CNC машина. Обим њихове примене је веома широк. Могу се користити за обраду метала, дрвета, пластичних маса, камена, стакла, за гравирање, израду алата, израду модела, итд.

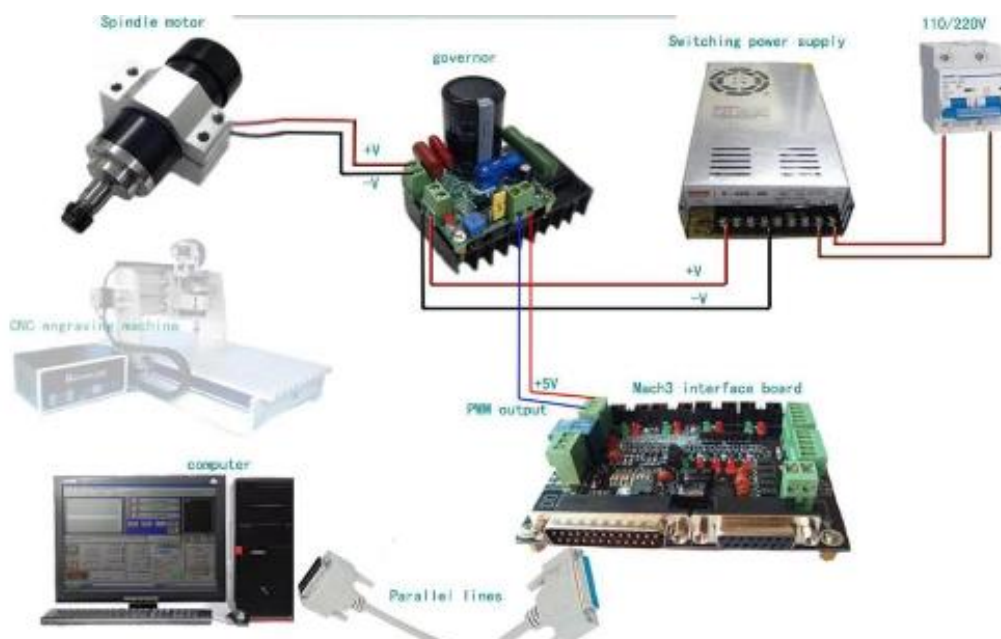
Уз помоћ одговарајућег CNC програма, за производ који се жели направити, релативна путања алата прорачуната и преведена на машински језик разумљив машини. Тај језик или Г-код заправо представља генерисане координате сваке тачке коју алат треба пређе.

На слици 3.1 дат је приказ једне савремене ЦНЦ машине.



Слика 3.1 CNC машина за резање плочастих материјала[4]

Погонски систем омогућује енергију потребну за кретање елемената система. У практичној употреби, погонски мотори су обично електромотори наизменичне и једносмерне струје, хидромотори, а као главно вретено се може користити мотор-вретено. На слици 3.2 приказан је пример повезивања рачунара, управљачке јединице и мотора код ЦНЦ машине.

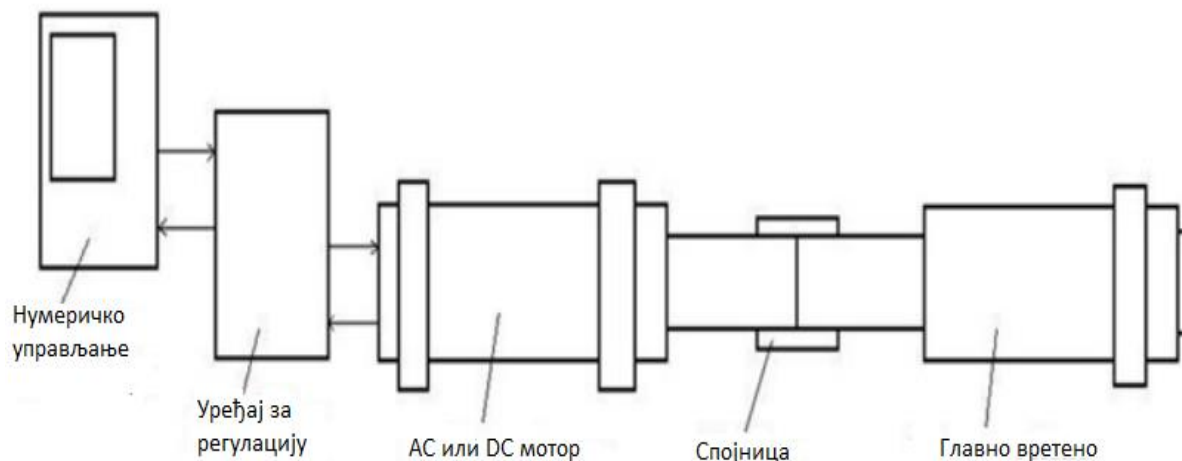


Слика 3.2 Пример везе рачунара, управљачке јединице и мотора ЦНЦ машине [4]

3.2 Развој мотор-вретена

Да би се постигла висока фреквенција ротације главног вретена, било је потребно развити адекватан погонски систем са довољном крутошћу. Развој погонских система текао је од неуправљаних асинхроних и ступњевитих погона, спољашњих погонских варијанти до монтажних електромотора и прецизних мотор-вретена.

Почетком деведесетих година прошлог века дошло је до интензивног развоја директног погона са фреквентном регулацијом броја обртаја. Такво решење је све више преовладало над конвенционалним погонским мотором са преносом обртног момента преко зупчастих преносника. Директни погон означава погон главног вретена које је зупчастом спојницом директно причвршћено на вретено електромотора као што је приказано на слици 3.3.



Слика 3.3 Директан погон[3]

Ова врста система за везу мотора и главног вретена даје велику крутост. Даље, конструкција је компактна и рад алата машине је мирнији са мањом буком, избегавају се губици ременског и зупчастог преноса. Код директног погона најчешће се користе трофазни кавезни асинхрони мотори. Они немају клизне прстенове и немају клизне контакте. Дакле, осим лежачева, нема других делова који су подвргнути механичком оптерећењу и хабању.

Кавезни асинхрони мотор је најједноставнији, специфично најлакши и најјефтинији, најпоузданији и самим тим најчешће коришћен мотор за погон код машина алатки. Такође, регулација брзине ротације се лако остварује променом фреквенције. У подручју директног погона главна вретена укључују и мотор-вретена. Слика 3.4 приказује историјски преглед развоја конструкције главног вретена и мотор-вретена.



Слика 3.4 Историјски развој главног вретена и мотор-вретена[1]

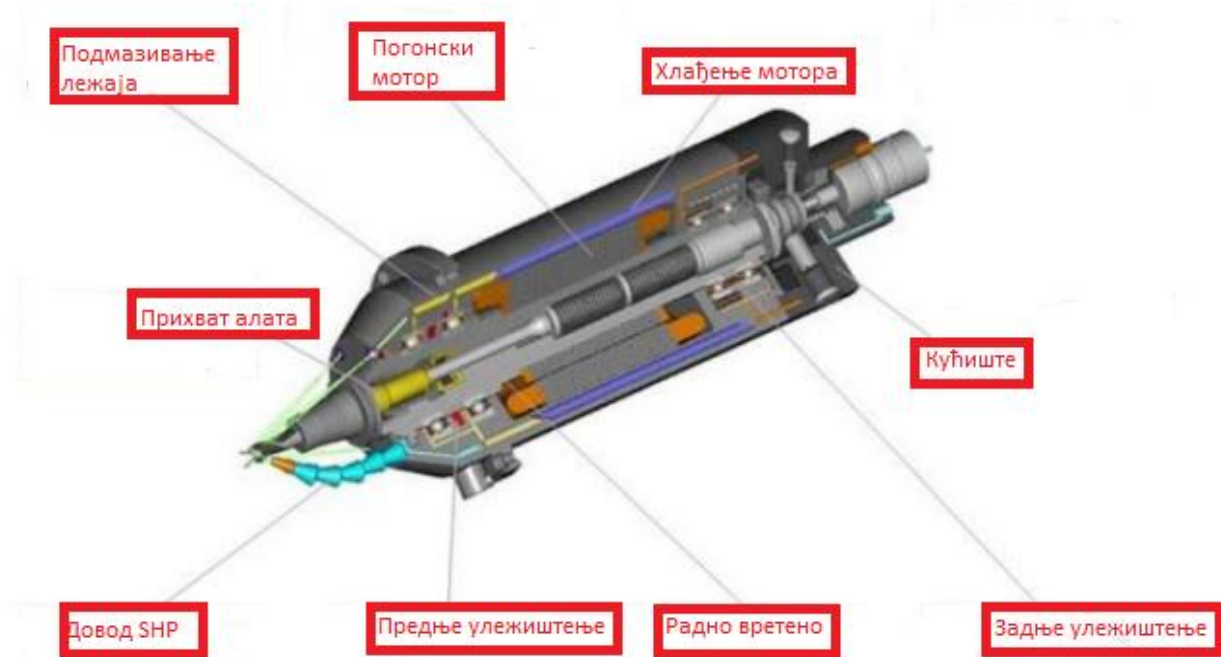
Може се уочити прелаз са главног вретена са ременима и зупчаницама на мотор-вретена са којима се могу остварити знатно веће брзине резања. Континуирани развој хибридних лежајева, подмазивања, материјала котрљајућих елемената и погонских мотора и фреквентних претварача омогућио је изградњу мотор-вретена која тренутно задовољава широк спектар захтева тржишта ка великим снагама и високим учестаностима ротације.

3.3 Погон мотор-вретена

Мотор-вретено је главно вретено са интегрисаним мотором, тј. електрични мотор чија осовина представља главно вретено машине алатке. Код мотор-вретена се све чешће користе перманентно побуђени синхрони мотори. У том случају ротор је снабдевен с перманентним магнетима који су смештени у металним кућиштима уместо да су налепљени. У намотају статора се добија константна снага у широком распону фреквенција.

Карактеристике оптерећења су још повољније него код индукцијских мотора. У ротору не тече струја тако да остаје готово потпуно хладан. Због тога је осовински помак вретена у односу на кућиште, узрокован топлотним издужењем, релативно мали. Такође, дужи је век трајања код уљем подмазаних лежајева и већа стабилност у читавом опсегу брзине. Из свега тога произилази могућност израде мотора с већом густином снаге. Дакле, код истих величина конструкције може се постићи 20 - 30% већи обртни момент.

Код мотор-вретана сила за стезање алата омогућује брзе аутоматске промене алата. Сила стезања се постиже стезним чаурама или спиралним опругама. Међутим, ове опруге су извор неравнотеже у раду вретена. Уместо опруга често се користе стезни пнеуматски системи. Предност пнеуматских система за стезање алата је једноставна и компактна целина стезног система. Једини проблем са пнеуматским системом је могућност губитка притиска у пнеуматској инсталацији што резултира губитком силе стезања. Данас се уместо пнеуматског система или опруга све више користе систем стезања са електричним линеарним мотором. Осим краћег времена за стезање постиже се већи квалитет уравнотежености вратила силе стезања се могу стално контролисати.



Слика 3.5 Пресек мотор вретена са прегледом делова[1]

Мотор-вретено приказано на слици 3.5 је намењено за постизање великих брзина ротације и прихват, и стезање носача алата за обраду резањем. На овај начин се постиже висока крутост система и једноставна измена резних алата. Мотор-вретена омогућују велике брзине обртања, у опсегу од 12000 до 100000 о/мин и више.

Предности мотор-вретена су боља динамичка уравнотеженост, тачније позиционирање на припадајућу осу машине, мања бука и миран рад. Све то омогућава стварање услова за висок квалитет обрађене површине, бољу стабилност и велике брзине ротације резног алата са минималном вибрацијом. Такође, због своје компактности, мотор-вретена се веома лако инсталирају у алатне машине.

Недостатак мотор-вретена у односу на директни погон главног вретена преко спојнице је у термичким својствима. Интегрисани мотор ствара додатну топлоту у вретену, узрокујући термичко ширење, због чега је потребно интензивно хлађење. За хлађење се најчешће користе вода, ваздух и уље.

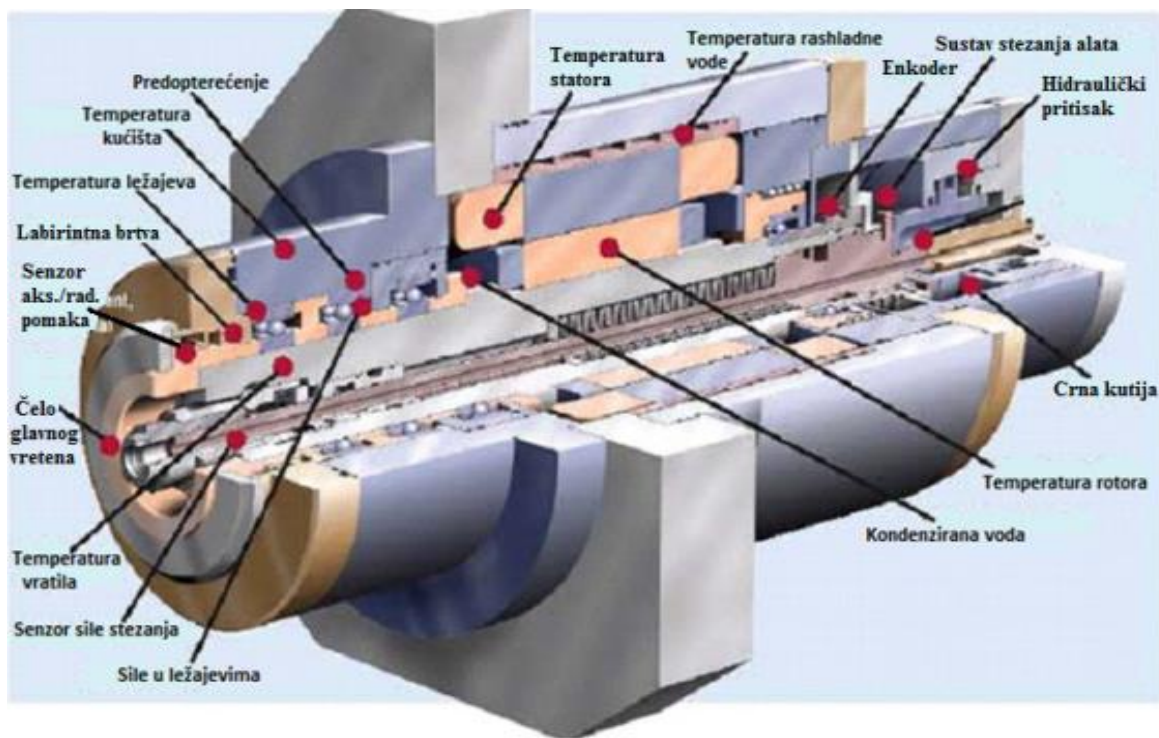
У табели 1 су приказане карактеристике мотор-вретена за машине алатке за високобрзинску обраду. Може се видети вретено глодалице са малим димензијама и основним држачем алата за резање.

Табела 1. Карактеристике мотор-вретена за високобрзинску обраду[3]

Мотор-вретено (глодање)	
Мах. учесталост ротације	60000 1/min
Номинална учесталост ротације	39500 1/min
Номинална снага (S1-100%)	10 kW
Отпуштање резног алата	Хидраулично
Мотор	АС
Момент инерције (главног вретена)	0,00085 kgm ²
Облик кућишта	Цилиндрични
Систем стезања алата	HSK E-25
Оперативна позиција	Вертикална
Пречник гл. вретена код предњег лежаја	30 mm
Подмазивање лежајева	Уље/ваздух

Термичка дилатација вретена током процеса може бити велики проблем ако је пожељна висока тачност. Такође, због топлотне дилатације, може доћи до судара резног алата и обратка који могу оштетити скупа вретена за велике брзине. Из тих разлога, неки произвођачи нуде системе са топлотном компензацијом. Такав систем функционише на аутоматском подешавању топлотних промена у X, Y и Z оси. Ово је засновано на мапи топлотног пораста за сваку машину алатку, израђеној пре саме обраде. Та мапа температурне расподеле је израђена помоћу сензора на машини и омогућује добијање профила очекиваних дилатација вретена и резног алата, као функција фреквенције ротације и времена обраде. Ове информације су у управљачкој јединици машине чиме је омогућено прилагођавање услова обраде ради компензације топлотних дилатација.

На слици 3.6 приказан је општи пример мотор-вретена са својим битним деловима, уграђеним сензорима где се очитава температура у мотор-вретену и остале величине битне за управљање процесом (нпр. силе стезања, отпори резања и др.).



Слика 3.6 Мотор-вретено са уграђеним сензорима и дисплејом [1]

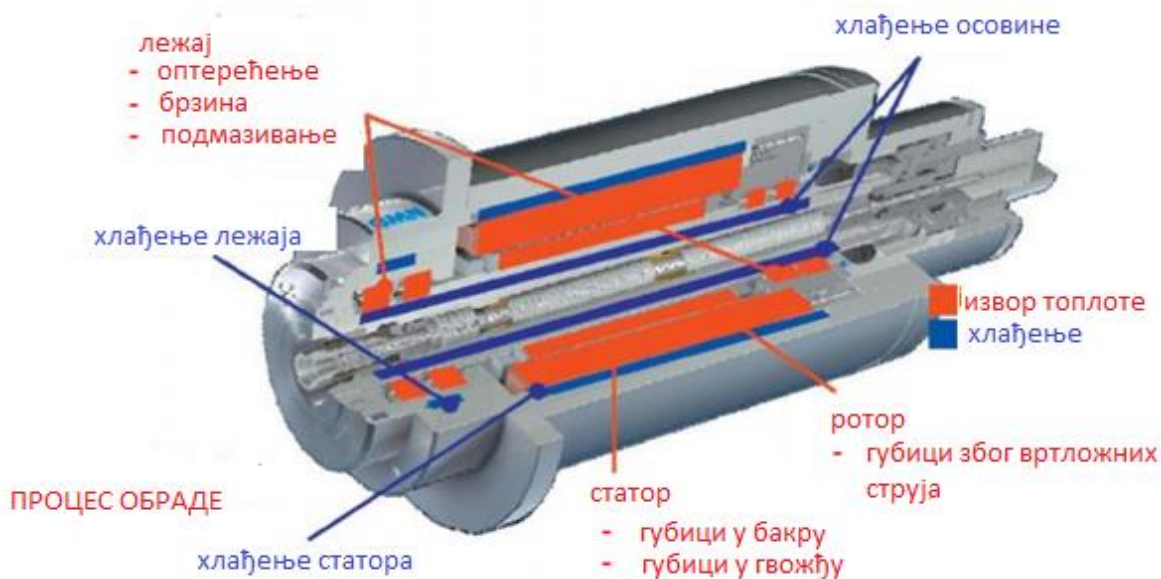
Држач алата је интерфејс између алата и вретена. Поред велике крутости, адекватног пригушивања и способности преноса потребних сила / обртних момената, ови системи би требали омогућити брз, тачан и поуздан поступак промене алата. Веома свеобухватни прегледи интерфејса вретена/алата дати су Cipro-овом главном листу, као и у WeckReinartz.

3.4 Хлађење мотор-вретена

Мотор-вретена су опремљена моторима велике снаге који производе велику количину изгубљене топлоте. Због тога у већини примена кућиште вретена пролази кроз течни расхладни медиј у затвореном расхладном кругу.

На слици 3.7 је приказан начин хлађења мотора и лежајева[1].

Начин хлађења мотор-вретена је прилично сложен због потребе постојања периферних уређаја (расхладна јединица, циркулациона пумпа, инсталација и др.). Нова развијена решења су омогућила другачије системе хлађења са угаоним кућиштем вретена. Потпора кућишта је проширена и опремљена вентилатором са посебним погоном. Кућиште има отворе у својим угловима тако да је омогућен проток ваздуха у аксијалном смеру изазван вентилатором. Додатни ефекат хлађења се постиже стварањем протока ваздуха кроз додатне посебне отворе на кућишту мотора.



Слика 3.7 Хлађење мотора и лежајева[1]

Да би се смањиле топлотна дилатације система мотор-вретена са ваздушним хлађењем, предложена је контрола и управљање температуром доводног ваздуха на основу концепта топлотне равнотеже. Развијени систем обезбеђује топлотну равнотежу између стварања топлоте у зазорима лежајева и расхладног ефекта доведеног ваздуха, тако да је могуће елиминисати топлотну деформацију целокупног система мотор-вретена, укључујући и остале делове система.

4. ПРИМЕРИ КОНСТРУКТИВНИХ РЕШЕЊА МОТОР-ВРЕТЕНА

На слици 4.1 приказан пример мотор-вретена као један од производа фирме MYL Шпанија, намењено за брусилице, са следећим карактеристикама [5]:

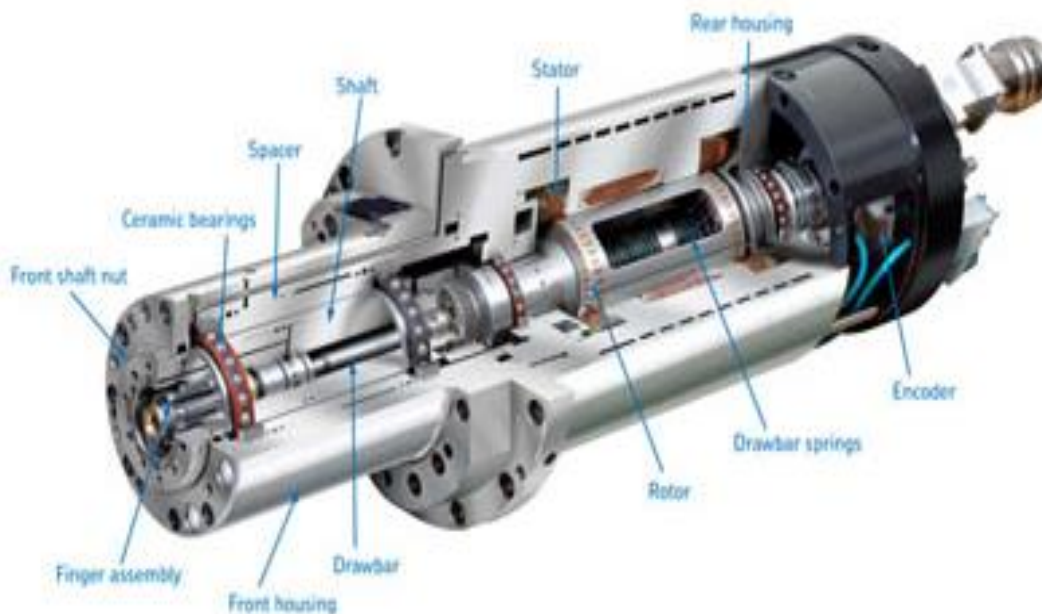
- Компактно кућиште се лако уграђује у машине.
- Повећана прецизности рада због недостатка механичких компоненти између кућишта вретена и ротирајућег вратила.
- Бољи квалитет површине и висока тачност обраде.
- Омогућена дужа обрада брушењем са оштрим брусним елементима.
- Велика аксијална и радијална крутост.
- Дужи хидростатички век лежаја.
- Веома мало трење.
- Веома мало загревање вретена, само неколико °C.
- Мали отпори услед трења се преносе помоћу уља, које хлади све делове.
- Крутост и носивост су независни од брзина брушења
- Број обртаја се може континуално подесити од 0 до n_{max} .
- Нема губитка у прецизности након укључивања хидрауличног система.
- Помоћу хидростатичких вретена добија се одличну кружност пречника брушења, а мерење се постиже брже и прецизније.
- По потреби се вретено испоручује са хидрауличним осталим деловима система за довод уља и резервоаром за уље.



Слика 4.1 Пример мотор-вретена са хидрауличним погоном фирме MYL Шпанија[5]

На слици 4.2 приказан је пресек електричног мотор-вретена фирме MYL. Ово мотор-вретено, као што се може видети на слици, има следеће делове:

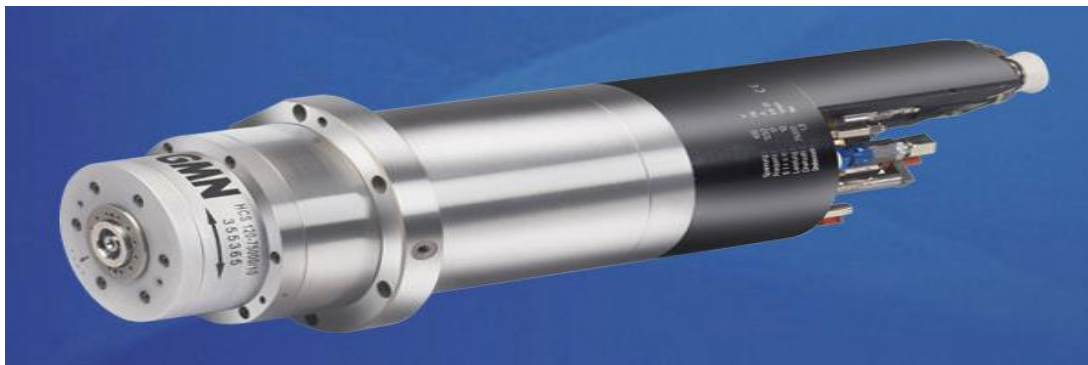
- *rear housing* – задње кућиште
- *encoder* - енкодер
- *drawbar springs* – опруге спојнице
- *stator* - статор
- *rotor* – ротор
- *shaft* – вратило
- *spacer* – предње кућиште
- *drawbar* – извлачење
- *front housing* – предње кућиште
- *ceramic bearings* – керамички лежачеви
- *front shaft nut* – навртка предње осовине
- *finger assembly* – склоп стезне чауре



Слика 4.2 Пресек електричног мотор-вретена фирме MYL, Шпанија [5]

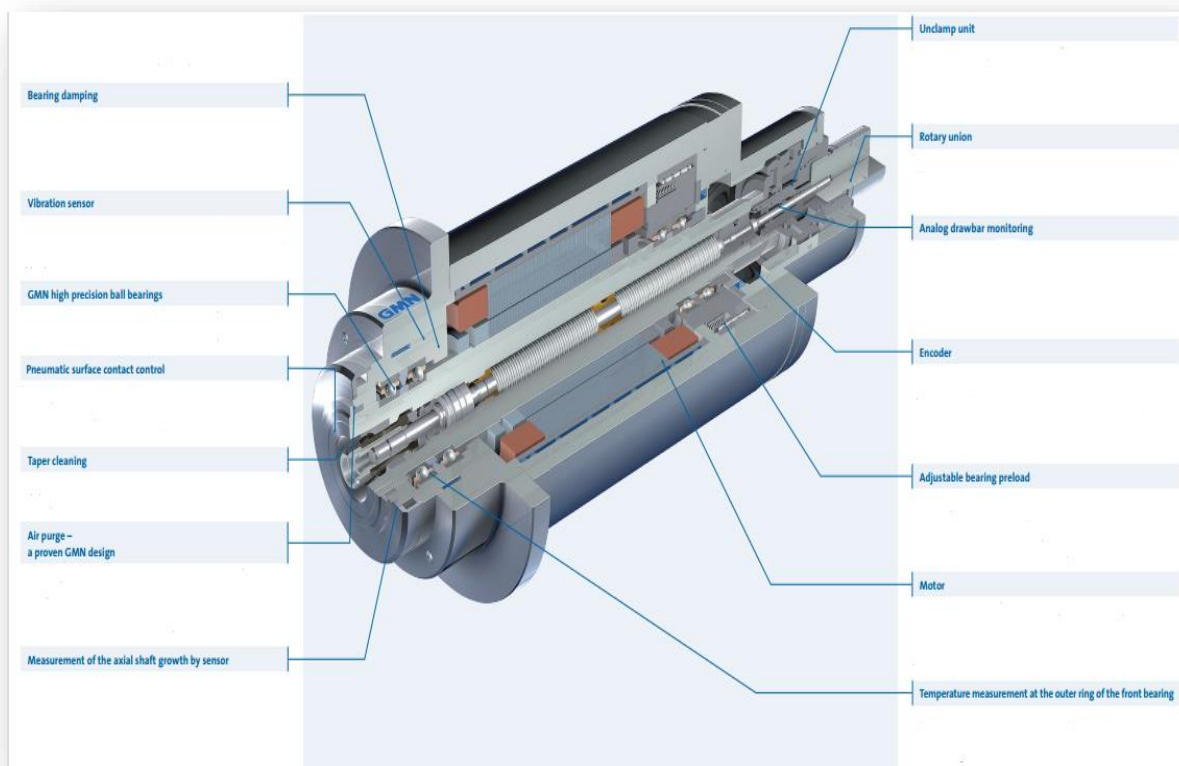
На слици 4.3 приказан је пример нове, потпуно редизајниране серије мотор-вретена за микро обраду фирме GMN, Немачка са следећим карактеристикама:

Тип UHC 120-75000/10 мотор-вретана је намењена за машине за микро обраду. Ова конструкција мотор-вретена је заснована на високо прецизним кугличним лежачевима из сопствене производње и подмазивањем уље/ваздух. Знатно мале вибрације омогућују постизање великих брзина. Тиме се постиже побољшана површинска обрада и повећава се радни век вретена.



Слика 4.3 Пример мотор-вретено за глодање са аутоматском изменом алата фирме GMN, Немачка [6]

Претходне верзије мотор-вретена даљим развојем су унапређене и имају мању тежину и мање димензије. То је довело до побољшаних динамичких карактеристика и бољег квалитета микро обраде. На пример, мотор-вретено UHS 120-75000/10 постиже до 13,5 kW (S6-40%) при 75.000 о/мин. Притисак расхладне течности кроз осовину вретена достиже и до 80 бара [6].



Слика 4.4 Пресек мотор вретена фирме GMN[6]

На слици 4.4 приказан је пресек мотор-вретена, на коме се виде делови који га чине. Карактеристике овог мотор-вретена су:

- да би се избегле вибрације, користи се хидростатички пригушивач. Ово побољшава квалитет обраде и значајно продужава радни век лежајева,
- сензор вибрација. Неприхватљиве вибрације могу се рано открити и одмах се могу предузети одговарајуће мере за стабилизацију процеса,
- *GMN* користи сопствене високо прецизне кугличне лежајеви који имају високу поузданост и висок ниво квалитета израде
- пнеуматско управљање површинским контактом алата и стезног система (сензор открива могуће остатке материјала мерећи проток ваздуха између површине стезног система и алата. Ово осигурава сигурно и квалитетно постављање алата),
- чишћење конуса стезног система (конусне површине држача алата се чисте компримованим ваздухом. Ово омогућује испуњење повећаних захтеве за чврстим и сигурним позиционирањем и стезањем алата),
- филтрирање ваздуха - континуалан проток ваздуха излази из прореа између осовине и кућишта, штити вретено од контаминације средством за хлађење и подмазивање честицама. Ово обезбеђује сигурно функционисање мотор-вретена,
- мерење промене димензија аксијалног вратила помоћу сензора (откривање пораста дужине услед температурних дилатација омогућује управљање којим се постиже захтевани положај машине и алата. На тај начин се постићи највећа тачност и квалитет обраде),
- јединице за стезање алата - алат се стеже и отпушта преко пнеуматског или хидрауличног система. Нови систем за стезање је електрични *UNCLAMP* систем. Ово решење не захтева компримовани ваздух и хидраулично уље за стезање алата,
- ротациона спојница омогућује проток средства за хлађење и подмазивање директно до резне ивице алата што резултира дужим радним веком алата,
- аналогно праћење положаја помоћу сензора за „алат стегнут“, „алат без стезања“ и „стегнути без алата“ омогућује сигурне радне услове система вретена и алата,
- *encoder* - високе резолуције унутар вретена у било ком тренутку бележи стварну брзину и тачан угаони положај осовине. На пример, могуће је константно ротационо кретање осовине при малим брзинама и резања навоја помоћу алата,
- подесиво преднапрезање лежајева олакшава прилагођавање преднапрезања лежаја захтевима обраде. Крутост и радни век се могу оптимизовати за одређена вретена модификацијом предоптерећења које зависи од брзине обртања,
- мотор (према захтевима мотор-вретено може бити опремљено асинхроним или синхроним мотором. Мотори фирме *GMN* су веома ефикасни у погледу перформанси),
- мерење температуре на спољашњем прстену предњег лежаја служи за откривање пораста температуре предњег лежаја. Систем лежаја може се заштитити од преоптерећења.

DECIDC-60BATS 1.5 kW мотор-вретено, фирме *MORET* - Кина (слика 4.5) има број обртаја до 60000 о/мин, водено хлађено мотор-вретено пречника 62 мм, хибридни

куглични лежај, компактне је конструкције и високе крутости, помоћу посебног лежаја има високу тачности радијалног одступања до 1 μm . Електронски систем за фино балансирање резултира тихим и без вибрација радом. Трофазни асинхрони мотори је са заштитом од хабања, тако да је смањена потреба за подмазивањем. Пнеуматска баријера спречава да прашина и остала загађења уђе у унутрашњи део вретена. Пнеуматско активирање за стезање и отпуштање алата омогућава аутоматску измену алата [7].



Слика 4.5 Мотор вретено са воденим хлађењем и стезним системом, MORET - Кина [7]

Како би се осигурало да поступци обраде на алатним машинама не морају нужно довести до значајних оштећења мотор-вретена, лежајева вретена и других осетљивих компоненти, компанија JAKOB Antriebstechnik Немачка, је развила систем заштите мотор-вретена MS³, приказан на слици 4.6.

Различити узроци могу довести до оштећења мотор-вретена. Поред грешака у програмирању, погрешно дефинисаним алатима, непоштовања контура предмета обраде и ограничења путање алата, чак и ненамерни поступци при великим брзинама могу довести до нежељених случајева. Проблем је скоро увек исти без обзира на узрок: вршна сила до 100 kN делује на лежајеве и остале компоненте.



Слика 4.6 Заштитни систем мотор-вретена MS³ [8]

Код овог система може доћи до оштећења алата или држача алата који се у таквом случају једноставно мењају. Систем омогућује заустављање процеса обраде пре озбиљних оштећења мотор-вретена или деформација на кућишту машине. Набавка система MS^3 у почетку није мала инвестиција. Међутим, инвестиција се брзо исплати јер при великосеријској и масовној производњи ризик од нежељених оштећења је велики а трошкови застоја производне опреме су огромни.

Механички заштитни системи, који су уграђени у системе MS^3 компаније *JAKOB Antriebstechnik*, реагују знатно пре него што управљачки систем машине добије информацију о оштећењу и потреби заустављања рада машине. Након дејства механичког сигурносног система који искључује ротацију мотор-вретена управљачка јединица машине покреће кочење и заустављање кретања алата и предмета обраде и спречава даља могућа оштећења. Систем MS^3 се увек претходно прилагођава одговарајућој намени: сила држања магнета и геометрија система се морају прилагодити мотор-вретену и операцији која се изводи. Захваљујући систему сталних магнета и резултирајућој покретљивости MS^3 система може се реаговати подједнако на аксијални и радијални судар. У исто време, систем обезбеђује висок степен крутости током обраде.

Siemens, Немачка нуди сопствено решење мотор-вретена које пружају максималну продуктивност и прецизност, и обезбеђују оптималне перформансе и квалитет обраде на машинама алаткама. Механички уграђена мотор-вретена су изузетно компактна и постижу максималну крутост, што је услов за постизање максималних брзина и тачне центричности израде делова.



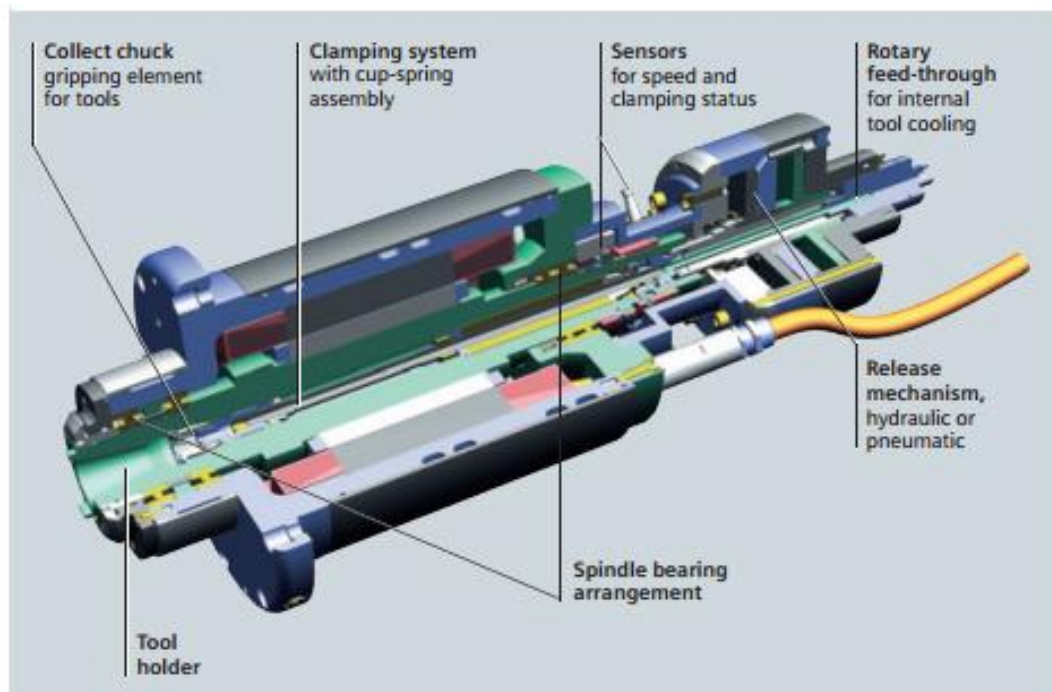
Слика 4.7 Мотор вретено компаније *Siemens*, Немачка [9]

У случају потребе за мотор-вретеном на глодалици, једно од најбољих решења су *Siemens*ова компактна 2SP1 мотор-вретена са воденим хлађењем. За разлику од мотор-вретена са спољним погоном 2SP1 имају висок степен компактности, прецизности и продуктивности. Ово мотор-вретено има знатно мање делова у поређењу са решењем помоћу погонског каишног преносника. Уграђена је сензорска технологија за праћење и надзор.

На слици 4.8 приказан је попречни пресек мотор-вретена компаније *Siemens*, са основним деловима.

Предности и карактеристике овог вретена су:

- одличан квалитет завршне обраде, максимална центричност и висока динамичка крутост,
- кратка времена убрзања и велике максималне брзине,
- компактан дизајн,
- флексибилно прилагођавање потребама корисника захваљујући великом броју различитих система стезања алата и радних комада,
- једноставна инсталација и пуштање у рад захваљујући сопственим управљачким системом,
- једноставна инсталација са дефинисаним интерфејсима за механику, хлађење, електронику и хидраулику / пнеуматику и
- прилагођена за употребу са управљачким системом *SINAMICS S120* и погонским системом *SIMODRIVE 611* различитих машина.



Слика 4.8 Попречни пресек мотор-вретена компаније *Siemens*[9]

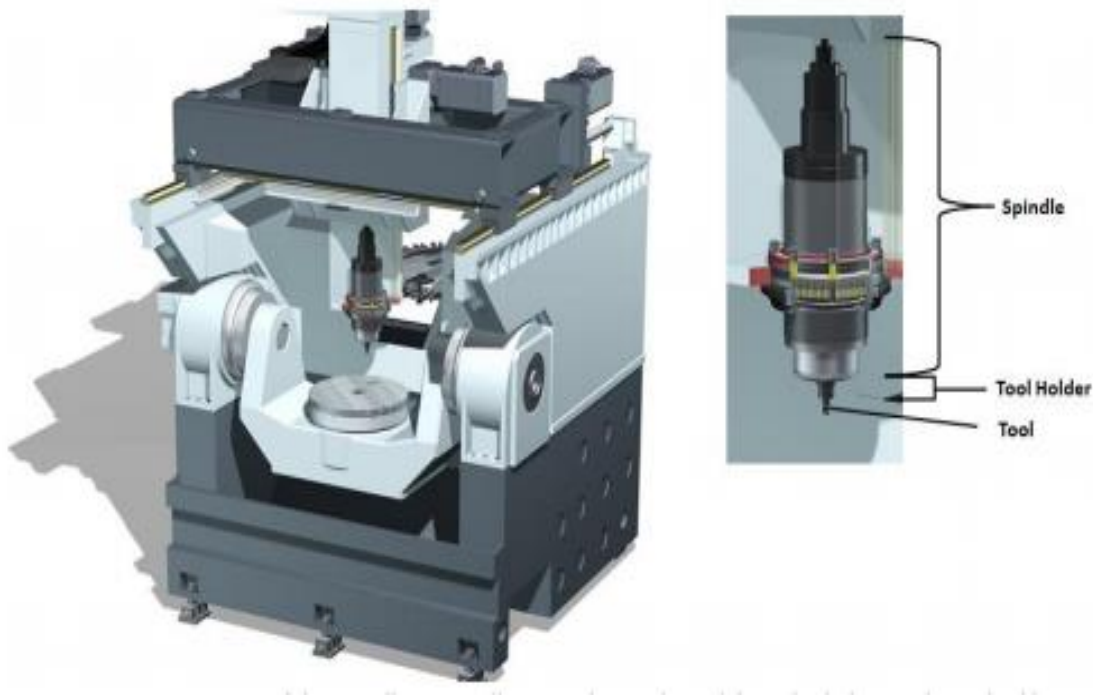
Као што се може видети на слици 4.8 ово мотор-вретено се састоји од: стезне главе која садржи елементе за стезања алата са склопом чаура и опруга, сензора за брзину и статус стезања, ротирајућег довода за унутрашње хлађење алата, хидраулични или пнеуматски механизма за стезање и отпуштање, лежајеве вретена и држач алата.

Обрадни системи са алатима са унутрашњим довођењем средства за хлађење и подмазивање (СХП) су у порасту, јер чине обраду метала ефикаснијом. За то се могу користити високобрзинска мотор-вретена са ротационим системом за довод СХП компаније *SycoTec GmbH & Co. KG, Leutkirch* Немачка. Ова мотор-вретена омогућује број обртаја 5000 - 60000 о/мин. На слици 4.9 приказан је пример мањег HF мотор-вретена 4040 DC – S - DD намењеног за бушилице, глодалице, брусилице и машине за гравирање.



Слика 4.9 Hf – мотор вретено [9]

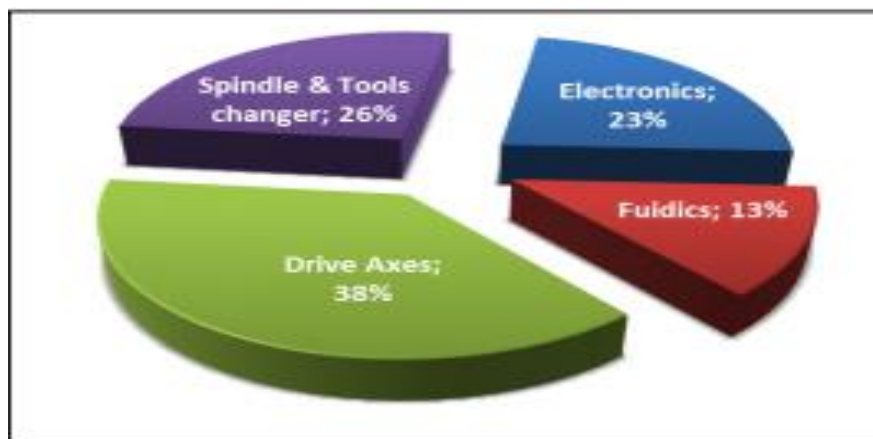
Алати са унутрашњим рупама за довођење СХП - на пример код бушилица и глодалица омогућују да СХП хлади резну ивицу где се загрева и истовремено уклања струготину. Ово знатно повећава радни век алата. У случају микро-бушења могуће је бушење великих дубина у односу на пречник бушења без честог извлачења алата из предмета обраде.



Слика 4.10 Положај мотор вретена код вертикалног обрадног центра[10]

Алатне машине су састављене од више подсклопова где је вретено важна конструкцијска компонента која се налази у различитом положају, зависно од конфигурације алатне машине. У глодалицама се, уместо тога, углавном користе у вертикалном положају и носе држач алата. На слици 4.10 је приказан пример вертикалног вишеосног обрадног центра са мотор-вретеном. За разлику од класичних ЦНЦ глодалица, код вертикалних обрадних центара радно вретено може бити постављено хоризонтално или под било којим углом. Код хоризонталних обрадних центара погон предмета обраде може бити са мотор-вретеном, а такође и окретни алати могу бити погоњени мотор-вретеном.

Примена мотор-вретена омогућује решавање многих проблема, при чему су откази услед проблема у раду главног вретена били једни од главних застоја и отказа алатних машина у прерађивачкој индустрији. У немачкој студији (Fleischer, et al., 2008, p. 175) где је прикупљено много информација о одржавању са 250 машина алатки у индустрији производње аутомобила, четири главна подсистема машине су одговорна за већину застоја. У оквиру њих, главном вретену и систему за измену алата припада чак 26% застоја и отказа, што је други главни узрок након погона оса као што приказује слика 4.11. До сличних резултата су дошли истраживачи на челу са Häggblom, 2013. у раду спроведеном у сарадњи с главним произвођачем аутомобила из Шведске. Студија се заснива на анализи података о одржавању сакупљених током две године од 15 алатних машина на производним линијама. Код застоја дужих од три сата, проблеми у вези са преносницима код главног вретена и погону алата чинили су приближно 21% од укупног броја. Ова два примера показују негативне ефекте застоја услед отказа главног вретена унутар производних система. Ти застоји неизбежно заустављају процес производње и стварају велике трошкове за поправке и велике трошкове услед губитака у производњи. Примена мотор-вретена доприноси да се застоји значајно смање, а тиме и трошкови производње. Може се очекивати даљи развој обрадних система уз све већу примену мотор-вретена.



Слика 4.11 Четири главне саставне компоненте у алатним машинама које доводе до застоја [10]

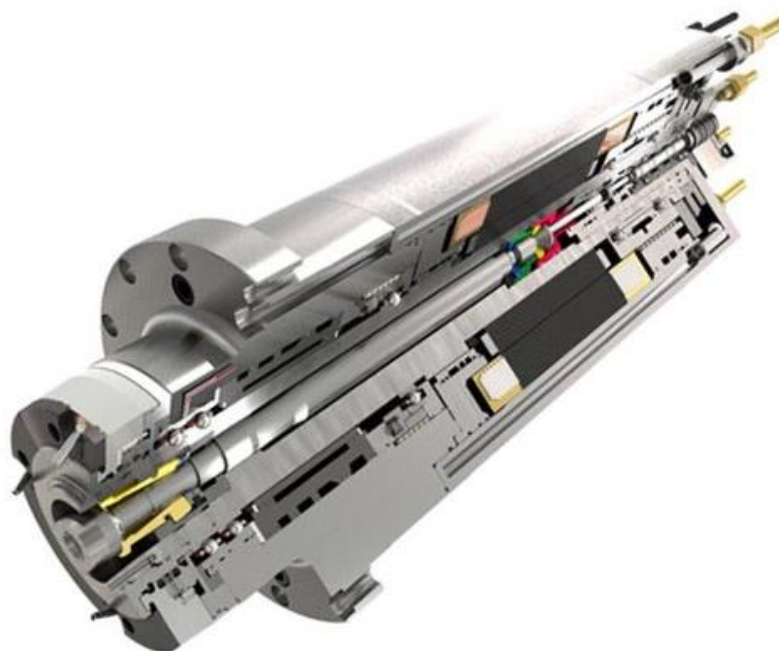
На слици 4.12 је приказано мотор-вретено намењено за уградњу у ЦНЦ машине, а које се може набавити слободно на тржишту. Уградња ових мотор-вретена је при градњи нових

машина, као и ретрофиту старих машина. Може се видети да приказани комплет садржи мотор-вретено снаге 2.2 KW водено хлађен, Инвертор VFD, кућиште мотор-вретена пречника 80 мм, водену пумпу за хлађење и комплет стезних чаура за стезање алата (бургија, глодала или носача алата за брушење). Максимални број обртаја је 24.000 о/мин а управљање фреквенцијом 0-400 Hz. Водена пумпа 75 W има проток 3.200 л/час. Овај комплет мотор-вретено је намењено за глодалице, бушилице, машине за брушење, рутер машине (гравирање и сл.), као и за самоградњу хоби машина.

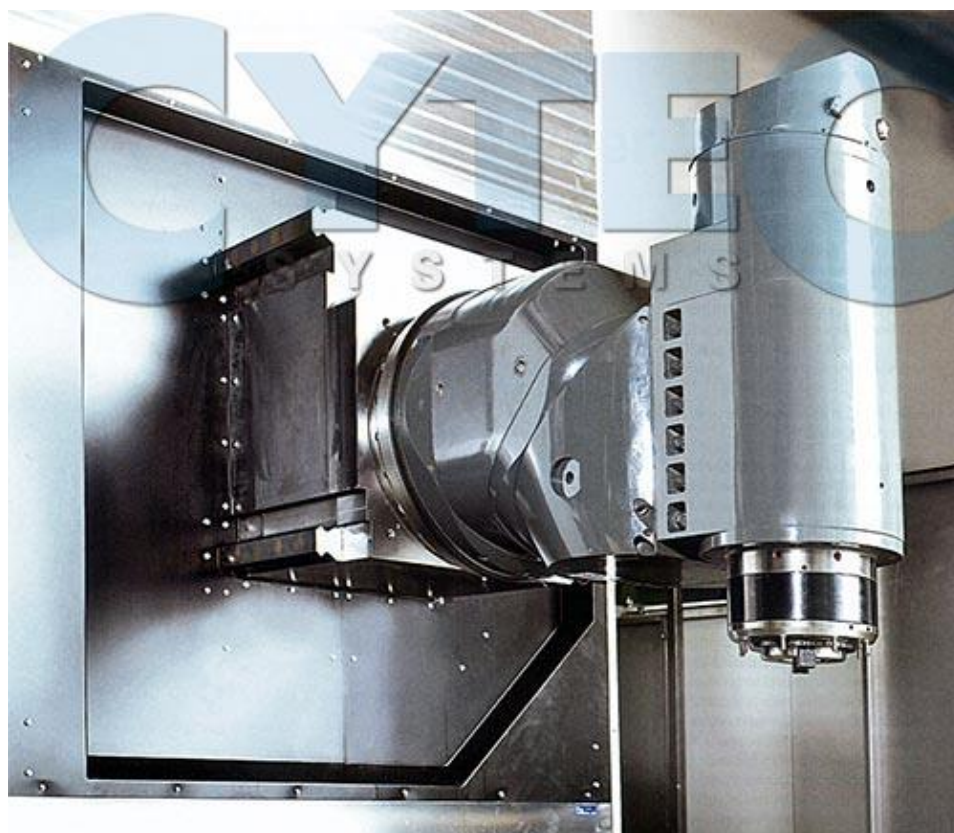


Слика 4.12 Пример комплета мотор-вретена [11]

Мотор-вретено компаније *CyTec Zylindertechnik GmbH* Немачка снаге 2.2 KW је приказано на слици 4.13. Намењено је за ЦНЦ машине и високобрзинску обраду, има водено хлађење и једноставан начин стезања и отпуштања резног алата са различитим прихватом (HSK, BT, CAPTO, CAT, DIN). Располаже са мониторингом температуре. Мотор-вретено омогућује довођење СХП кроз вретено и алат непосредно у зону резања, као и примену минималне количине СХП применом MQL система за хлађење маглом. Пример мотор-вретена компаније *CySpeed* Немачка је приказан на слици 4.13. На слици 4.14 приказан је пример уградње наведеног мотор-вретена у вертикални обрадни центар.



Слика 4.13 Пример мотор-вретена компаније SySpeed Немачка [12]



Слика 4.14 Пример уградње мотор-вретена у вертикални обрадни центар [13]

5. Закључак

Данас су брзина производње, тачност и флексибилност обраде кључни фактори за повећање продуктивности и успеха пласмана на светском тржишту у индустрији прераде метала. Ови фактори су утицали на развој високобрзинске обраде, која тежи сталном повећању брзине обраде и квалитетног резног алата који ће задовољити такве радне услове. Такође настоји да поједностави и аутоматизује саме алатне машине, што резултира свакодневним развојем нових концепата и модула машине.

У срцу сваког модерног алатног система, главна јединица вретена често је замишљена као моторизовано вретено. Ова компонента снажно доприноси продуктивности, прецизности и квалитету обрађеног производа. Бројни пројекти су реализовани за повећање перформанси, продуктивности и поузданост вретена. Многи концепти су развијени за интегрисање додатних сензора и актуатора у јединице вретена. Генерално, стање технике је прилично напредовало у поређењу с недавном прошлошћу. Данас су мотор-вретена стандард у савременој конструкцији машина, а модерни дизајни вретена садрже низ различитих система који су важни и потребни за њихову брзу и ефикасну примену.

Даљи развој обрадних система у области машина алатки биће директно повезано са технологијама са примењеним мотор-вретенима.

Савремена тржишта и даље имају много захтева:

- повећање обртног момента и брзине за примену мултифункционалне технологије (глодање, брушење и бушење истим вретеном),
- минимизирање потрошње енергије, укључујући периферне погонске уређаје, лежајеве и хлађење и
- обрад тешкообрадивих материјала.

Ови захтеви представљају увек изазове за будућа истраживања. На пример, изазов у области машинских елемената су котрљајни лежајеви који могу да постигну брзине од 3.000 m/min са "доживотним" подмазивањем мастима. Предвиђања топлотног ширења главног вретена и предвиђања промена у статичком и динамичком понашању вретена за време високобрзинске обраде тек треба да се реше са задовољавајућом тачношћу. Стога су мотор-вретена модули савремених алатних система који се и даље истражују, модернизују и усавршавају.

6. Литература

1. С. Захар, Машине алатке 2, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1997.
2. Златан Цар, Зоран Јурковић: Производна опрема, Завод за индустријско инжењерство и менаџмент (наставни материјал)
3. Милош Главоњић, Бранко Кокотовић, Саша Живановић: „Машине алатке - 2. Погони“, скрипта, Машински факултет у Београду
4. <https://www.industrija.rs/vesti/clanak/cnc-masine> (Приступљено 20.08.2019)
5. <http://www.myl.es/en/products/precision-spindles/> (Приступљено 02.09.2019)
6. https://www.directindustry.com/prod/talleres-myl/product-9283-1354789.html#product-item_25324 (Приступљено 02.09.2019)
7. https://www.weissgmbh.com/fileadmin/user_upload/downloads/prospekte/en/Spindellosesungen_en.pdf (Приступљено 02.09.2019)
8. <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/jakob-gruppe/Schlagfertige-Motorspindel-meistert-Crash-und-erhoeht-Maschinenverfuegbarkeit/boxid/897217> (Приступљено 02.09.2019)
9. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/wie-motorspindeln-die-effizienz-erhoehen-a-642765/> (Приступљено 02.09.2019)
10. Eduardo Torres Pérez, Study of vibration severity assessment for Machine Tool spindles within Condition Monitoring, Master Degree Project, KTH Royal Institute of Technology, 2015, Stockholm, Sweden
11. <https://bulkman3d.com/product/spk-1500/> (Приступљено 10.09.2019.)
12. https://www.cyttec-systems.fr/en/contact_cyttec_5axis_cnc_machining_equipment.html (Приступљено 10.09.2019.)
13. https://www.cyttec-systems.fr/en/cyttec_high_speed_machining_equipment_motor_spindles.html (Приступљено 10.09.2019.)