

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Ústav technologie projektování, obrábění
a metrologie



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přesná frézovací centra



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hubáček** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **475023**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přesná frézovací centra

Název bakalářské práce anglicky:

High precision milling centers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Frézování - obecná charakteristika, kinematické poměry, technologické možnosti
- 2) Vysoce přesná obráběcí centra - řešení dílčích konstrukčních celků
- 3) Porovnání s CNC centry obvyklých přesností
- 4) Průzkum trhu 3-osých a 5-osých frézovacích center, porovnání

Seznam doporučené literatury:

- 1) Katalogy a prezentační materiály předních světových výrobců strojů - Micron, Makino, Kern, Yazda, Mauser
- 2) DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23.6.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma *Přesná frézovací centra* vypracoval samostatně a použil jsem podklady a literaturu uvedenou v příloženém seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 28. července 2020

Podpis autora:

Martin Hubáček

Poděkování

Děkuji Ing. Zdeňku Pitrmucovi za odborné vedení bakalářské práce, trpělivost a cenné připomínky. Děkuji Barbaře Bergmann ze společnosti Kern a Ing. Jensovi Müllerovi ze společnosti Kugler za poskytnutí podrobných informací k jejich výrobkům. Za podporu a ochotu děkuji svým nejbližším.

Anotace

V bakalářské práci jsou porovnávány super-precise frézovací CNC předních světových výrobců: Kern, Yasda, Mikron, Makino, Krause-Mauser, Kugler. Jsou posuzovány z hlediska počtu os, přesnosti, vedení, vlastností vřetena, materiálu lože a doplňujícího vybavení. V závěru jsou formulována doporučení pro výběr stroje z hlediska univerzality a přesnosti.

Klíčová slova: obrábění kovů, přesnost, super-precise frézování, opakovatelnost, vysokorychlostní frézovací centra

Annotation

The bachelor's thesis compares ultra-precise milling CNC of the world's leading manufacturers: Kern, Yasda, Mikron, Makino, Krause-Mauser, Kugler. They are assessed in terms of number of axes, accuracy, guideways, spindle properties, bed material and additional equipment. In the conclusion, recommendations for the selection of the machine in terms of versatility and accuracy are formulated.

Key words: metal machining, accuracy, ultra-precision milling, repeatability, high speed milling centers

Obsah

Úvod.....	7
1 Frézování.....	8
1.1 Princip frézování a rozdělení	8
1.2 Základní typy frézování	9
1.3 Frézovací parametry.....	10
1.4 Výhody a nevýhody frézování	11
1.5 Kinematická schémata	11
1.6 Klasifikace frézování podle počtu os	14
1.6.1 Tříosé frézování.....	14
1.6.2 Čtyřosé frézování.....	14
1.6.3 Pětiosé frézování.....	15
2 Vřetena	17
2.1 Vřetena podle pohonu	17
2.2 Vřetena podle upínání nástroje	19
2.3 Vřetena podle uložení	20
3 Materiál lože	21
4 Vedení a saně	23
4.1 Typy vedení	23
4.1.1 Valivá uložení.....	23
4.1.2 Kluzná uložení.....	24
5 Pohony	25
5.1 Typy pohonů	25
5.1.1 Pohony rotačních os.....	26
5.1.2 Pohony posuvných os	26
6 Běžná frézovací centra a přesná frézovací centra	29
6.1 Výrobci přesných obráběcích center.....	31
6.2 Tříosá centra.....	32
6.3 Pětiosá centra	34
7 Vyhodnocení	36
Závěr	39
Použitá literatura	40
Seznam obrázků	44
Seznam tabulek	45

Úvod

Frézování patří mezi základní výrobní technologie ve strojírenství. U frézování, stejně jako v dalších oblastech třískového obrábění, došlo v posledních desetiletích k zásadnímu pokroku a zefektivnění výroby. Nároky na přesnost ve strojírenství rostou úměrně rychlosti vývoje a je proto potřeba věnovat pozornost právě možnostem zvyšování přesnosti, ale i hledat způsoby obrábění bez nutnosti následných dokončovacích operací. Takovéto zlepšení způsobu obrábění představuje znatelné zvýšení kvality. V případech, u kterých již nebude potřeba dalších dokončovacích operací, se může dosáhnout i úspor. To by mohlo částečně kompenzovat přirozeně vyšší cenu stroje schopného tak přesného obrábění.

Cílem bakalářské práce je porovnat aktuální dostupné super-přesné frézovací CNC u zadaných společností z hlediska vybraných charakteristik a srovnat je s obvykle používanými centry.

Dodatkem *super přesné* se může označit jen velmi malá část současné průmyslové výroby a počet výrobců strojů splňujících dále zmíněná kritéria není mnoho. Práce se zaměřuje zejména na tyto společnosti a jejich aktuální katalogy nabízených strojů: Kern, Yasda, Mikron, Makino, Krause-Mausser, Kugler. Jednotlivá zařízení jsou srovnávána podle počtu os, přesnosti, typu vedení, vlastností vřetena, materiálu lože a doplňujícího vybavení. Pro kontrast je vhodné uvést i příklady běžných produkčních obráběcích center, která stále převažují v sektoru třískového obrábění. Je také potřeba si uvědomit, že s technickým pokrokem se mění i nároky na kvalitativní parametry výrobků a stroje dnes považované za běžné by například ještě před několika lety patřily do kategorie *super přesné*. Této skutečnosti je přizpůsoben výběr podkladů pro bakalářskou práci a použitých informačních zdrojů. Firemní katalogy jsou aktuální v době zpracování této rešerše.

Bakalářská práce je standardně členěna do dvou částí. V první části jsou shromážděny teoretické poznatky k frézování a představují teoretická východiska pro druhou, analytickou část bakalářské práce. Pozornost je zaměřena zejména na kinematická schémata frézování, charakteristické parametry frézování a srovnávané vlastnosti frézovacích center. V druhé, analytické části bakalářské práce, jsou porovnávána CNC z hlediska sledovaných parametrů specifikovaných v teoretické části bakalářské práce a tato srovnání vyhodnocena.

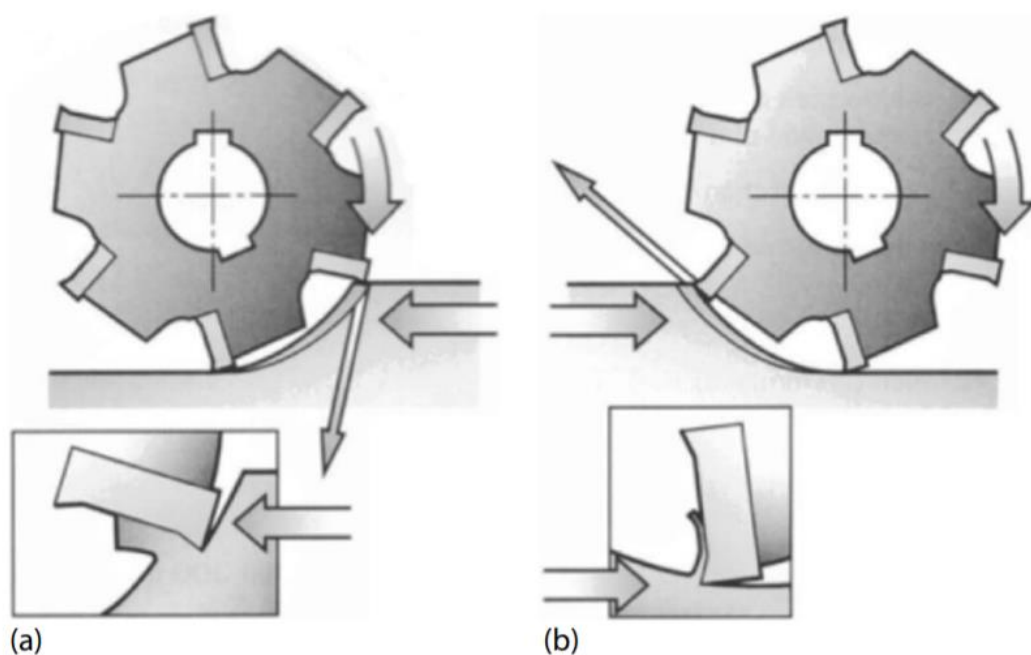
1 Frézování

Frézování je druh třískového obrábění, kde hlavní pohyb koná nástroj. Nástroj – fréza – je upnuta ve vřeteni obráběcího centra. Vřeteno rotuje a u moderních strojů se může rovněž natáčet a posouvat. Mezi zásadní výhody patří možnost obrábění složitých obecných ploch a rovinných součástí. [1]

1.1 Princip frézování a rozdělení

Frézování patří mezi technologie odebírající přebytečný materiál. Úběr materiálu zajišťuje obvykle vícebřítá frézka, kterých existuje mnoho typů používaných pro různé aplikace. Standardně se rozlišuje frézování obvodové a čelní podle toho, jestli nástroj odebírá materiál na obvodu či čele. Podle pohybu nástroje vůči obrobku dělíme frézování na sousledné a nesousledné. [2, 3]

Při sousledném frézování má vektor rychlosti břitu při výstupu ze záběru stejný směr jako vektor rychlosti posuvného pohybu obrobku. Hloubka třísky klesá a největší průřez má v počátku záběru, jak je patrné z obr. 1a. U nesousledného frézování se fréza otáčí proti směru posuvu obrobku, na obr. 1b je znázorněno, jak hloubka třísky roste z nuly na maximální hodnotu při konci záběru. [2, 3]



Obr. 1 - Sousledné a nesousledné frézování [2]

Oba přístupy mají své výhody i nevýhody. Sousedné frézování se využívá například při obrábění slitin niklu a obecně materiálů náchylných na poškození povrchu. Zároveň mají působící síly tendenci tlačit obrobek ke stolu a tím snižují nároky na upnutí i redukuje vibrace. Nesousedné frézování je vhodné pro aplikace u tvrdých povrchů například z litiny či povrchů ovlivněných řezáním plamenem. Bývá využíváno u obrobků s velmi proměnlivou výškou povrchu. [2]

Pokud osa nástroje neprotíná obrobek, tak se realizuje pouze jeden ze zmíněných případů. Jestliže však osa nástroje obrobek protíná, dochází zároveň k souslednému i nesouslednému frézování na různých částech frézy. [2]

1.2 Základní typy frézování

Frézování obvodové

U obvodového frézování dochází k obrábění na obvodu nástroje a čelní plocha by se ideálně neměla dostat do kontaktu s obráběným povrchem. Nástrojem je válcová fréza připevněna na hřídeli s osou rovnoběžnou s obráběnou plochou. Klasická cirkulární pila rovněž splňuje definici obvodové frézy, ale z důvodu rozdílného využití často nebývá do rozdělení vůbec zahrnuta. [4]

Frézování čelní

Při čelním frézování převážnou část materiálu sice odebírají břity zubů na vnějším poloměru, nicméně výsledný povrch je obráběn také čelem nástroje s osou kolmou k obrobku. Využívá se převážně pro relativně široké povrchy a pouze rovné plochy. Na rozdíl od obvodového frézování se síly při obrábění rozloží rovnoměrněji a fréza má vyšší tuhost, protože je umístěna přímo na vřetení. Zároveň není potřeba ložisek pro trn, což znamená větší flexibilitu v rozměrech obrobku a na odebrání konkrétního množství materiálu potřebuje čelní frézování menší výkon než obvodové. [2, 4]

V dnešní době se nejčastěji používají stopkové frézy, které by se mohly řadit mezi frézy čelní. Mají břity jak na obvodu, tak i čele. Jsou to relativně tenké nástroje podobné vrtákům. Umožňují obrábění ploch, které by za použití pouze čelních či obvodových fréz nebylo prakticky možné vyrobit. Z důvodu vysokého poměru délky k průměru nástroje a působíště výslednice sil blízko špičky se při přesnějších simulacích uvažuje poddajnost frézy. To limituje také tloušťku odebírané třísky, protože s většími reakčními silami roste

i deformace nástroje a klesá celková přesnost. I přes nižší účinnost v úběru materiálu bývá tato metoda preferována kvůli širokým možnostem využití. Pro snížení deformace se může například využít monolitických frézek ze slinutého karbidu s vyšší tuhostí než ocel, elektronického řízení posuvu nebo odebírat velmi tenké třísky. [2, 4]

Často se využívá také kulová fréza (Obr. 2), což je stopková fréza s kulovým zakončením. Při použití těchto fréz je potřeba využít složitější geometrickou analýzu pro výpočet odřezávané třísky z důvodu zakřivení čela. Kulová fréza se ve většině případů uplatňuje u složitých tvarů jako formy či lopatky turbín. [2]



Obr. 2 - Kulová fréza [5]

1.3 Frézovací parametry

Stejně jako u jiných technologických procesů jsou také u frézování voleny parametry respektující průběh operace. Jejich pomocí lze navrhnout potřebný výkon a ovlivňují výběr stroje, nástroje i použitého typu frézování. [6]

Řezná rychlost

Řezná rychlost udává rychlost pohybu břitu v místě styku s obráběným materiálem. Při vyšších řezných rychlostech a daném výkonu je nutné snížit posuv, aby nedošlo k přetížení stroje. Volba řezné rychlosti závisí zejména na obrobitelnosti konkrétního materiálu a představuje kompromis mezi kvalitou povrchu, strojním časem a životností nástroje. [4, 6]

Posuv

Každý břit ubírá malé množství materiálu při otáčce vřetena. Proto je běžné u frézování definovat posuv na jeden zub pro nástroj a posuv za minutu pro stroj. Díky tomu lze efektivně vypočítat například hloubku a plochu třísky, řezné síly i celkový strojní čas. S velikostí posuvu roste i účinnost metody, ale zároveň je limitována zejména dostupným výkonem, typem frézy a tloušťkou třísky. [4, 6]

Hloubka řezu

Hloubky řezu rozlišujeme dvě: axiální a radiální. Nazývají se také tloušťka a šířka třísky podle polohy k ose rotace vřetena. Udávají obráběnou plochu a společně s řeznou rychlostí určují potřebný výkon. Pro zachování konstantního výkonu a při zvýšení řezné rychlosti je zároveň nutné snížit posuv a tím i tloušťku třísky. [4, 6]

1.4 Výhody a nevýhody frézování

Frézovat se může libovolný povrch s přístupem pro nástroj. To znamená, že lze frézováním nahradit kteroukoliv obráběcí metodu. V některých aplikacích by však nebylo použití frézování ekonomicky výhodné. Je-li potřeba ubrat pouze malé množství materiálu nebo v případech kdy obrábíme velmi tvrdý povrch se převážně volí technologie broušení. Ta může být používána samostatně, ale běžně se kombinuje s frézováním jako dokončovací operace pro lepší kvalitu povrchu a přesnost. [4]

V dnešní době vidíme obrovský potenciál frézování společně s aditivními technologiemi také u výroby prototypů a výzkumu. Pro upravení obráběcích parametrů totiž není nutný zásah do strojního zařízení, ale pouze změna v nastavení programu nebo výměna nástroje, což je ekonomicky šetrné a zároveň časově efektivní řešení. Hlavní přednost frézování vždy byla a zřejmě i nadále bude možnost obrábění složitých obecných ploch a rychlého přizpůsobení technologie. [4]

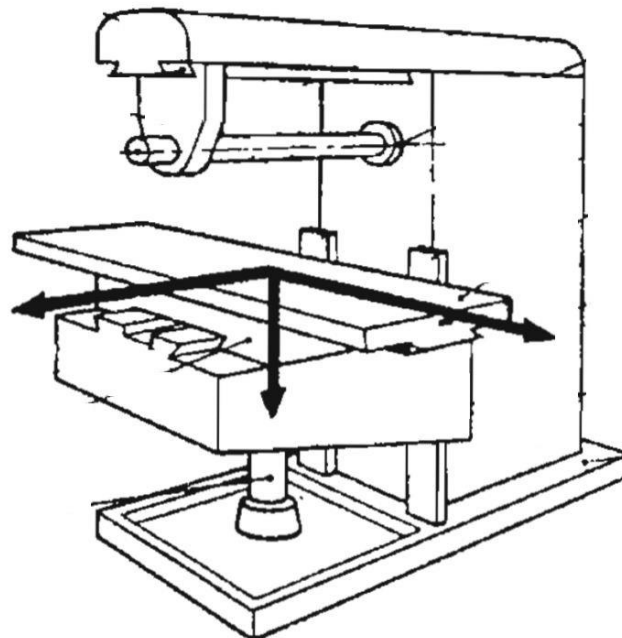
1.5 Kinematická schémata

K frézování je potřeba vytvořit mezi nástrojem a obrobkem relativní pohyb. V některých aplikacích se pohybuje pouze stůl či vřeteno, v jiných vřeteno i stůl. Pohyb vřetena je nezávislý na pohybu stolu a mohou se pohybovat i současně. Rozlišujeme frézovací stroje

horizontální a vertikální podle polohy vřetena a dělíme je podle konstrukce na tři základní typy: konzolové, stolové a portálové. [7]

Konzolové

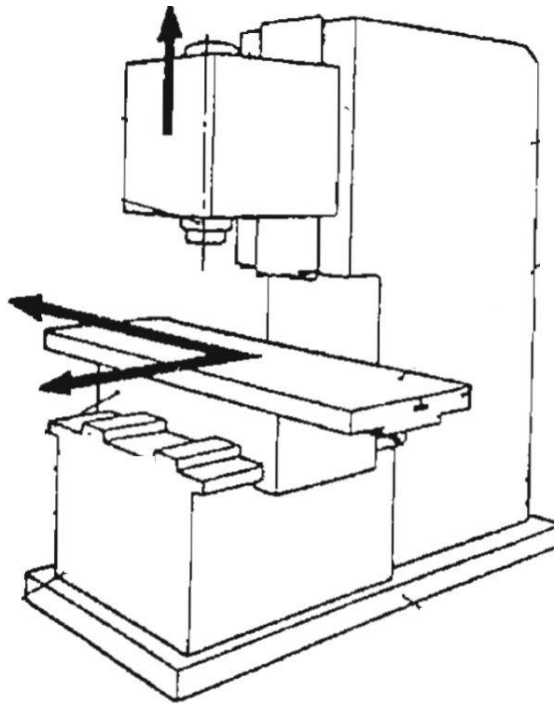
Konzolové frézky (Obr. 3) jsou nejrozšířenějším typem frézovacích strojů. Vřeteno je upevněno ve stojanu, který se při obrábění nepohybuje. Vřeteno pouze rotuje a nekoná posuvný pohyb ani ve směru vlastní osy. Pracovní stůl se posouvá v rovině kolmé na osu vřetena. Tento typ stroje je určen pro malé a střední obrobky, protože je hmotnost obrobku relativně nízká a pohybovat s ním se může poměrně snadno. [7]



Obr. 3 - Konzolová frézka [7]

Stolové

Stolové frézky (Obr. 4) se od konzolových liší zejména uložením vřetena a konstrukčním řešením posuvu ve svislé ose. Pro obrobky s větší hmotností by bylo výkonově náročné zvedat celou konzoli včetně obrobku, proto se obrobek se stolem posouvá pouze v jedné rovině. Posuv ve svislé ose koná vřeteno, které má menší hmotnost než obrobek. [7]

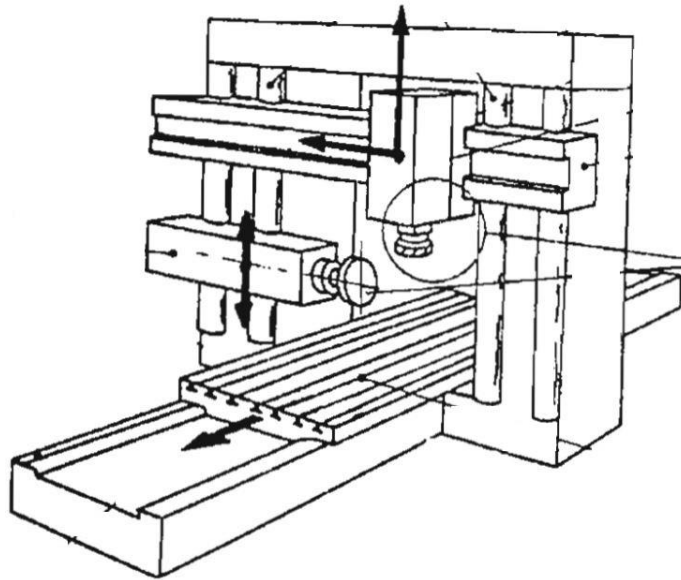


Obr. 4 - Stolová frézka [7]

Portálové

Portálové frézky (Obr. 5) se používají pro obrábění rozsáhlých obrobků. Analogicky ke konzolovým frézám, kde všechny posuvné pohyby vykonávala konzole společně s obrobkem, se u portálových pohybuje pouze vřetenová část stroje. Hlavní část stroje tvoří portál složený ze dvou stojanů spojených příčným příčником. Vyrábějí se také portálové frézky s posuvným stolem, což je obdoba frézky stolové, ale stůl se může například posouvat pouze v jednom směru. [7]

Moderní frézovací centra vycházejí ze základních kinematických schémat, ale nelze je přesně zařadit do některé ze zmíněných kategorií. Nejčastěji se setkáváme s konstrukcí portálového typu s jednou rotační osou stolu a možností naklápění vřetena, což je podrobněji rozebráno v další kapitole. [7]



Obr. 5 - Portálová frézka [7]

1.6 Klasifikace frézování podle počtu os

Počet os u frézování určuje počet směrů, ve kterých můžeme odebírat materiál. Jednoosé frézování je například řezání pilou, kdy zuby zabírají pouze v jedné přímce. Rozdělení podle os má však smysl pouze pro frézování s třemi či více osami. [8]

1.6.1 Třiosé frézování

Třiosé frézování obvykle bývá realizováno za pomoci posuvného stolu ve dvou osách na sebe vzájemně kolmých a vřetena na nezávislém suportu s osou kolmou k oběma osám roviny stolu. Tímto způsobem můžeme obrábět téměř libovolnou plochu, kterou lze promítnout do roviny stolu. V dnešní době se stále více zvyšuje tlak na komplexnost dílů a univerzálnost obráběcích strojů a z toho důvodu se do popředí dostávají stroje pětiosé, které však nabízejí možnost odebrání přídatných os a přechod pouze na třiosé frézování, což bývá prováděno zejména kvůli velikosti či hmotnosti obrobku. [8]

1.6.2 Čtyřosé frézování

Čtyřosé frézování konstrukčně vychází z třiosého frézování, ale zároveň umožňuje naklápění či rotaci jedné z os. Při třiosém frézování se obrábí pouze jedna rovina kolmá na osu vřetena. Naklápěním měníme průmět roviny kolmé k vřetenu a můžeme tak obrábět

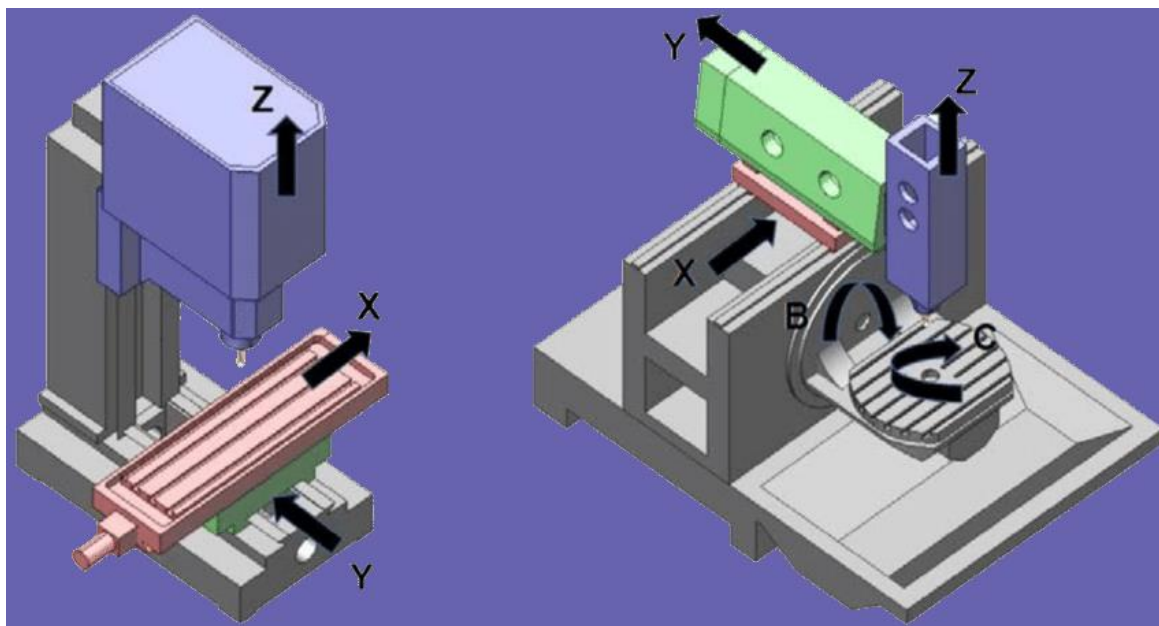
například rotační součásti (Obr. 6). Na čtyřosé frézování lze nahlížet jako na přechod z tří na pětiosé obrábění, které se od čtyřosého liší pouze přidáním další rotační osy. [8]



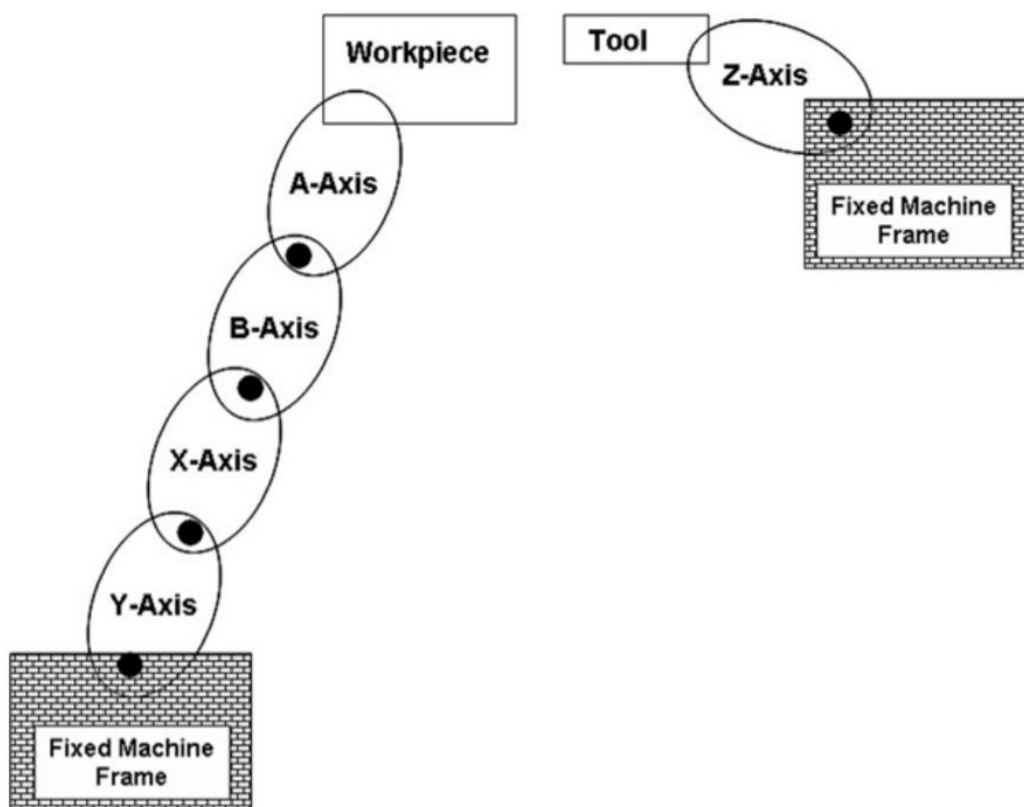
Obr. 6 - Ukázka čtyřosého frézovacího centra [9]

1.6.3 Pětiosé frézování

Pětiosé frézovací stroje nabízejí pět stupňů volnosti. Frézka se může naklánět vůči obrobku za současného pohybu ve všech třech osách. Břit se v základním souřadnicovém systému stroje pohybuje po nelineární trajektorii (Obr. 7). S využitím této kinematiky lze obrábět složité plochy. Je však potřeba zabránit kolizím mezi obrobkem a frézku či vřetenem. Ačkoliv se může zdát, že lze obrábět téměř libovolnou plochu, je nutné brát v potaz konstrukční řešení celého stroje, a to zejména při obrábění vnitřních ploch nebo kavit. Nejvíce rozšířeným zástupcem je stroj s třemi posuvnými a dvěma rotačními osami (Obr. 8). [8, 10]



Obr. 7 - Srovnání tří a pětiosého frézování [9]



Obr. 8 - Propojení os s obrobkem a nástrojem [10]

Vysvětlivky: Workpiece – obrobek, Axis – osa, Tool – nástroj, Fixed Machine Frame – rám

V další části jsou podrobněji popsány charakteristické znaky frézovacích center a podle nich následně jednotlivá centra srovnávána.

2 Vřetena

Vřeteno u frézování tvoří přechod mezi strojem a nástrojem, ale u jiných technologií může například spojovat obrobek a stroj. Jde o jednu z nejdůležitějších součástí celého frézovacího stroje, protože přenáší výkon a veškeré silové působení. Vlastnosti vřetene určují celkovou účinnost i přesnost obrábění. Vřeteno obsahuje upínací systém, který zajišťuje upínání a odepínání nástroje. Jelikož existuje mnoho různých typů vřeten, jsou dále popsána pouze vřetena využívané v porovnávaných strojích. Rozlišujeme vřetena podle pohonu, podle typu upínání a podle uložení. [2, 11]

2.1 Vřetena podle pohonu

Rozlišujeme 4 typy vřeten podle typu pohonu:

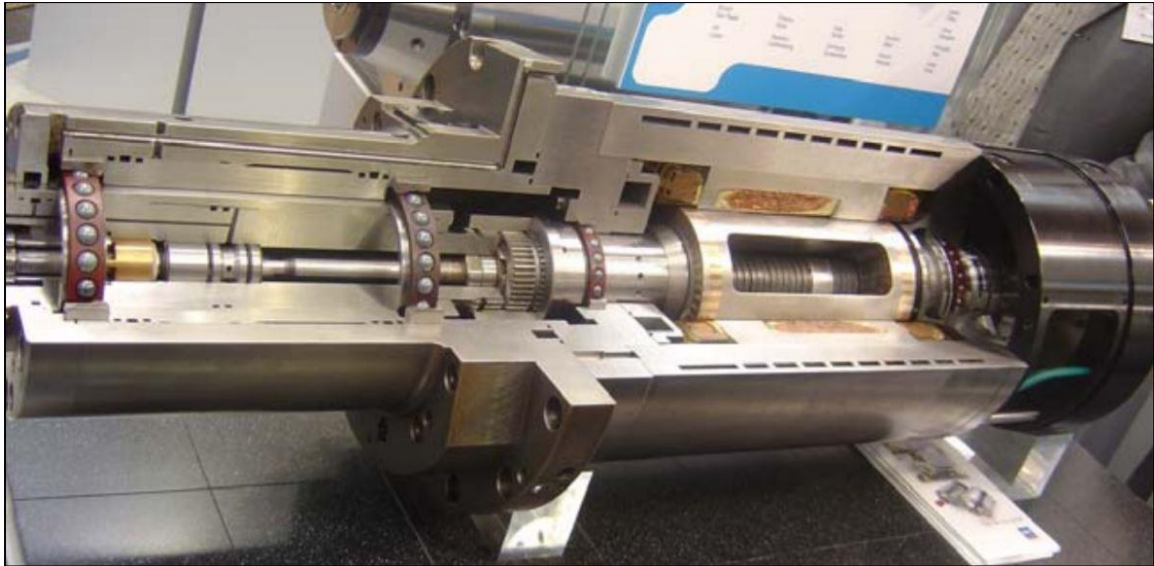
- vřetena s řemenovým převodem,
- vřetena s ozubeným převodem,
- vřetena s integrovaným (direct drive) motorem,
- vřetena s pneumatickým pohonem. [11]

Vřetena s řemenovým převodem představují přechod mezi vřeteny s ozubeným převodem a integrovaným pohonem jak v účinnosti (okolo 95 %), tak i rozsahu pracovních rychlostí a kroutících momentů. Rozmezí rychlostí, ve kterém jsou schopny dodávat požadovaný kroutící moment, je asi od 1 do 15 tisíc otáček za minutu. Proto se často využívají v případě rozsáhlejšího portfolia obrobků a změn obráběcích parametrů. [11]

Vřetena s ozubeným převodem jsou využívána v náročných provozech a přenášejí veliký kroutící moment i při nízkých otáčkách. Nejsou vhodná pro operace při vyšších rychlostech. Účinnost převodů se pohybuje kolem 90 % a ztrátová energie se mění na teplo, což negativně ovlivňuje výslednou přesnost. Při kontaktu kol zároveň dochází k vibracím, které se přenášejí až na nástroj a mohou mít negativní vliv na výslednou kvalitu povrchu. [11]

Vřetena s integrovaným (direct drive) pohonem se často nazývají elektrovřetena (Obr. 9), protože jsou poháněna synchronním nebo asynchronním motorem umístěným přímo v konstrukci samotného vřetena. Hlavní výhodou je kompaktnost bez nutnosti dalších převodů, periferií a obecně redukce prvků vnášející do systému vibrace či nepřesnosti. Mají téměř nulové ztráty a není u nich možné mechanicky zvýšit dodávaný kroutící moment. Vynechání periferií přináší nutnost odvádět teplo přímo z vřetena, což bývá zajištěno

chladicí kapalinou. Tato vřetena umožňují obrábění při rychlostech nad 15 000 otáček za minutu. Dříve byl problém dosáhnout požadovaného výkonu pro konkrétní rozměr vřetena. V důsledku technologického pokroku jsou v dnešní době již velmi rozšířená. [11]



Obr. 9 - Elektrovřeteno v řezu [11]

Vřetena s pneumatickým pohonem dosahují ze všech zmíněných vřeten nejvyšších rychlostí. Otáčky pneumatických vřeten u frézovacích center se běžně pohybují od 50 do 100 tisíc otáček za minutu. Při tak vysokých rychlostech se dosahuje nejlepší kvality povrchu. Většina pneumatických vřeten má malý průměr, ale vyrábějí se i s většími rozměry. Uložení pneumatických vřeten bývá aerostatické, protože by u vysokorychlostního vřetena hydrostatické uložení působilo značný odpor z důvodu vyšší viskozity kapalin než vzduchu. Okruh uložení není propojen s okruhem pro pohánějící vzduch, protože by v případě odpojení pohonu mohl poklesnout tlak v uložení a vřeteno se při doběhu poškodilo. U pneumatických vřeten je velmi obtížné regulovat jejich rychlost, protože mají relativně nízkou tuhost a při záběru skokově zpomalují. U přesného obrábění se proto odebírají pouze malé třísky při malých řezných silách, aby případné rozdíly otáček nebyly výrazné. [12]

U pohonů vřeten se v katalozích vyskytují dva typy zatížení. Norma definuje 10 druhů zatížení elektrických strojů značených S1 až S10. U frézovacích strojů se používá označení S1 pro trvalý výkon při konstantním zatížení a S6 pro výkon s přerušovaným zatížením, což odpovídá reálnému frézovacímu procesu, protože fréza není v záběru po celou dobu. U výkonu S6 se udává procentuální hodnota vyjadřující poměr doby zátěže ku celkové době provozu. [13]

2.2 Vřetena podle upínání nástroje

Upínací systém tvoří základ každého frézovacího vřetena. Mezi jeho funkce patří vytvoření pevného spojení nástroje a vřetene. Výběr upínače závisí na způsobu využití a možnostech nástroje. Požaduje se jednoduchá a automatická výměna nástroje spolu s přesným a pevným uložením při zachování správného vyvážení. Osa frézky by se měla ideálně shodovat s osou vřetena, čímž se docílí vyšší přesnosti. Upínací mechanismus se obvykle skládá z kužele, příruby a kleštiny. Kuželová část dosedá na kuželovou dutinu o stejné velikost ve vřeteni. Příruba umožňuje lepší skladování a zároveň přenáší silový tok při opření o přírubu vřetena. Kleština drží frézu. [11]

Bylo vyvinuto několik typů upínání nástrojů ve vřeteni. Nejvýznamnější a nejznámější z nich jsou CAT, BT, ISO (známé též jako SK) a HSK (Obr. 10). Převážná většina dnes využívaných frézovacích strojů využívá kónické upínání. Velmi známé typy upínání jako R8 či Morse kužel nebudou popisovány, protože se v dnešní době využívají pouze u manuálních aplikací. [11, 14]



Obr. 10 - Typy upínání nástrojů, zleva: BT50, CAT50, ISO30, HSK50A [11]

HSK využívá kontaktu kuželových ploch a zároveň příruby. Takové upnutí vyžaduje velmi vysokou přesnost nejen kontaktních ploch. Pokud by měl například kužel menší kuželovitost, došlo by pouze ke styku přírub a kuželová plocha by nebyla využita. Kuželová část je u HSK kratší než u ostatních typů a má úmyslně nižší tuhost. Díky tomu je mimo jiné možné rychleji vyměnit nástroje. Tento způsob upínání je určen pro velmi vysoké rychlosti, protože při vysokých rychlostech dochází k těsnějšímu spojení upínače a vřetena vlivem odstředivých sil. Rozlišujeme 6 typů upínání HSK – A, B, C, D, E a F. Každý typ má specifické využití podle velikosti momentu a provozních otáček. Pro přesné obrábění se využívají pouze typy E a F pracující při malém momentu a vysokých otáčkách. Za zmínku

stoi také relativně nový způsob upínání tzv. *Big-Plus*, u kterého na rozdíl od HSK dochází k pružné deformaci vřetena, nikoli upínače, a navíc lze zaměňovat upínače Big-Plus se standartními. [2, 11, 14]

2.3 Vřetena podle uložení

U frézovacích vřeten se běžně setkáváme se čtyřmi typy uložení:

- mechanické uložení,
- hydrostatické uložení,
- aerostatické uložení,
- magnetické uložení. [11]

Mechanické uložení využívá valivých ložisek. Kuličková ložiska se využívají pro vyšší rychlosti a válečková pro větší zatížení. Tento způsob uložení znamená vysokou tuhost, ale patří mezi méně přesné, a proto se u přesných center nevyužívá. Zásadní posun u mechanického uložení přineslo využití keramických kuliček, které mají oproti běžně využívaným ocelovým mnoho výhod, například menší hustotu, malou teplotní roztažnost a zanedbatelnou afinitu k oceli, která je příčinou opotřebení z důvodu adheze. Hlavní nevýhodou je křehkost keramického materiálu, což vyžaduje opatrnost při provozu a manipulaci. [11]

Hydrostatické uložení eliminuje některé nevýhody mechanického uložení, zejména omezenou životnosti a problémy s vibracemi a hlukem. Valivé elementy jsou nahrazeny vrstvou oleje pod vysokým tlakem. Limitujícím faktorem je úměrnost třecího napětí a rychlosti u tekutin, zejména kapalin. Pokud se vyžadují velmi vysoké rychlosti, musí se využívat aerostatické či magnetické uložení. [11]

Aerostatické uložení funguje na stejném principu jako hydrostatické. Místo vrstvy oleje zde nosné medium představuje vzduch. Výhodou je nízké tření, dlouhá životnost a jednoduchá konstrukce. Toto uložení se může využívat pouze pro nízké zátěže z důvodu nízkého tlumení a sklonu k vibracím. Třecí napětí je u vzduchu při vyšších rychlostech mnohem nižší než při stejných rychlostech u kapalin, protože vzduch má mnohonásobně nižší viskozitu než kapaliny. Představují optimální řešení pro přesná centra, jelikož zatížení u přesných center bývají malá a vyžadují vysoké rezné rychlosti. [11]

Magnetické uložení využívá magnetické pole pro levitaci nástrojové hřídele. Nedochází zde na rozdíl od mechanického uložení ke kontaktu ploch, čímž se eliminuje negativní vliv tření a opotřebení. Zároveň to znamená, že není téměř omezena rychlost, kterou se může nástroj pohybovat. Jediný zdroj tepla je u tohoto typu uložení proud procházející vodičem generující magnetické pole. Množství uvolňovaného tepla je ve srovnání s teplem uvolňovaným u třecích uložení mnohem nižší. [11]

3 Materiál lože

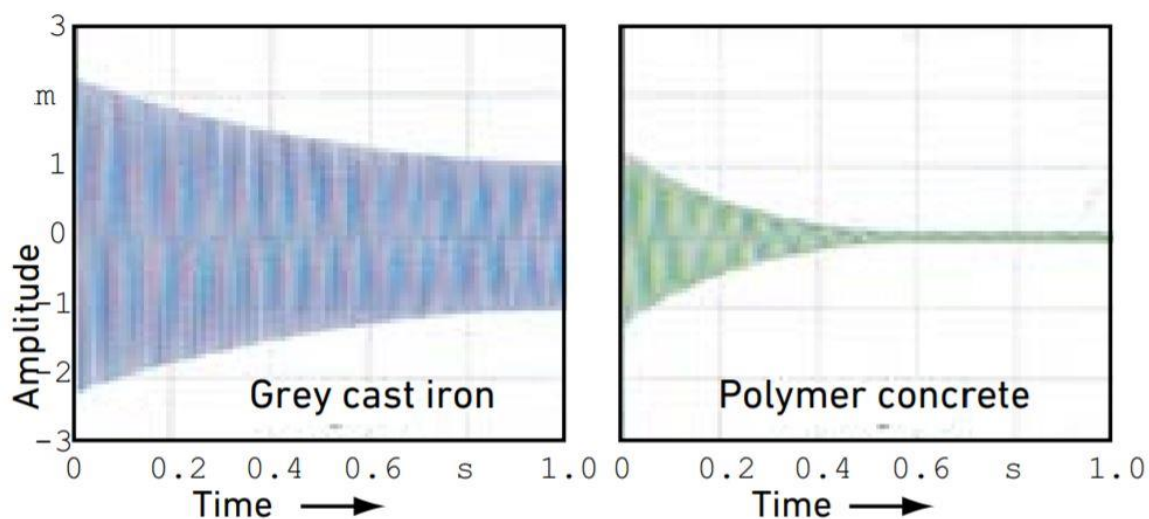
Lože společně s rámem tvoří nosnou strukturu celého frézovacího stroje. Obvykle je z jediného kusu materiálu a zaujímá většinu hmotnosti frézky. Dříve se využívaly zejména litinové materiály. V dnešní době má litina stále široké uplatnění, ale portfolio možností se výrazně rozšířilo. Stále probíhá výzkum nových materiálů s důrazem na nízkou teplotní roztažnost, tuhost a tlumení vibrací. Pro účely rešerše je vhodné zmínit 4 materiály, které se využívají pro lože frézovacích center nejčastěji, a to:

- litina,
- beton,
- polymerický beton – Granitan,
- přírodní žula – granit. [2, 15, 16]

Litina je nejrozšířenější materiál pro lože frézovacích center. Technologie slévání umožňuje vytvořit velice rozměrné části jako jeden celek. Celkovou přesnost pak neovlivňuje heterogenita způsobená například šroubovými spoji či sváry. Litinové lože má relativně nízkou teplotní roztažnost a tlumí vibrace mnohonásobně lépe než ocelové. Ocel se pro lože dynamicky namáhaných strojů téměř nemůže použít zejména z důvodu slabého tlumení. [16]

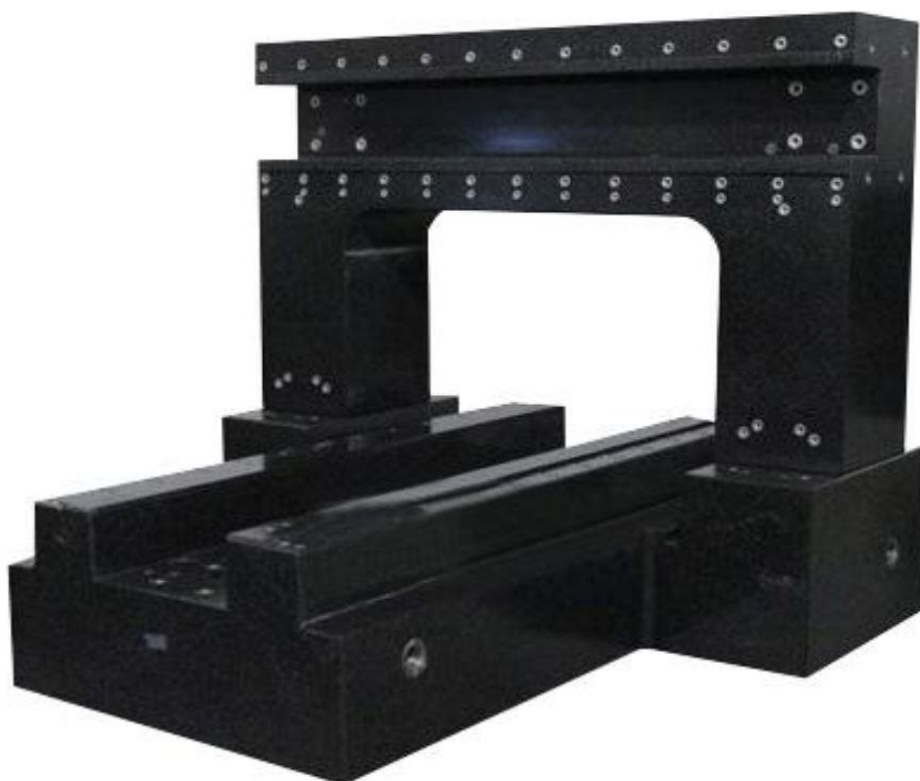
Beton se používal u loží frézovacích strojů už za druhé světové války z důvodu nízké ceny a nedostatku kovových materiálů. Více se beton uplatil v konstrukci loží až od sedmdesátých let minulého století, kdy se začal využívat polymerický beton. [16]

Polymerický beton – Granitan si lze představit jako vylepšenou verzi klasického cementového betonu. Pojivem bývají syntetické pryskyřice. Vzniká z práškové směsi a lze z něj vyrábět složitější tvary. Dosahované tlumení může být až třicetkrát vyšší než u litinových loží (Obr. 11). [16]



Obr. 11 - Graflumení litiny a Granitanu [17]

Přírodní žula – granit je v současné době nejrozšířenějším materiálem pro lože vysoce přesných strojů pro frézování, ale i metrologické aplikace (Obr. 12). Těží se v jižní Africe ve formě velikých bloků a lože tvoří jediný monolit. Na rozdíl od polymerického betonu jde o přírodní materiál bez umělých příměsí. Tepelná roztažnost granitu je nižší než Granitanu a v porovnání s ocelí zhruba poloviční. [16]



Obr. 12 - Lože z granitu [18]

4 Vedení a saně

Velmi důležitými částmi frézovacích strojů jsou vedení a saně zajišťující pozicování obrobku i nástroje. Saně jsou části stroje, které pohybují obrobkem a nástrojem po vedení. Určují celkovou účinnost a výslednou přesnost. Výběr ovlivňuje mnoho parametrů. Základní a běžně uváděné rozhodující parametry v katalogích jsou rychlost pohybu, přesnost najetí a opakovatelnost. Dále mezi ně patří nosnost, tření, chování při změnách teploty, náročnost údržby a tlumení. [2]

Je potřeba si uvědomit, že přesná obráběcí centra pracující s přesností v jednotkách mikrometrů vyžadují vysokou kvalitu a přesnost všech částí, včetně regulace teploty. Relativně malé nepřesnosti v částech vzdálených od místa obrábění mohou přesto ovlivnit a znehodnotit celý obráběcí proces. [2, 11]

4.1 Typy vedení

Vedení se rozlišují podle profilu a uložení. Některé typy bývají vytvořeny přímo v základním materiálu lože, složitější se většinou přidávají jako doplněk a zároveň umožňují výměnu. Často bývají v kombinaci s povlaky snižujícími tření a otěr. Výběr vedení významně závisí na zvoleném uložení, rozlišujeme kluzná a mechanická. Kluzné systémy (hydrostatické, aerostatické) používají tekutinový film, u valivých typů klasická ložiska. [2]

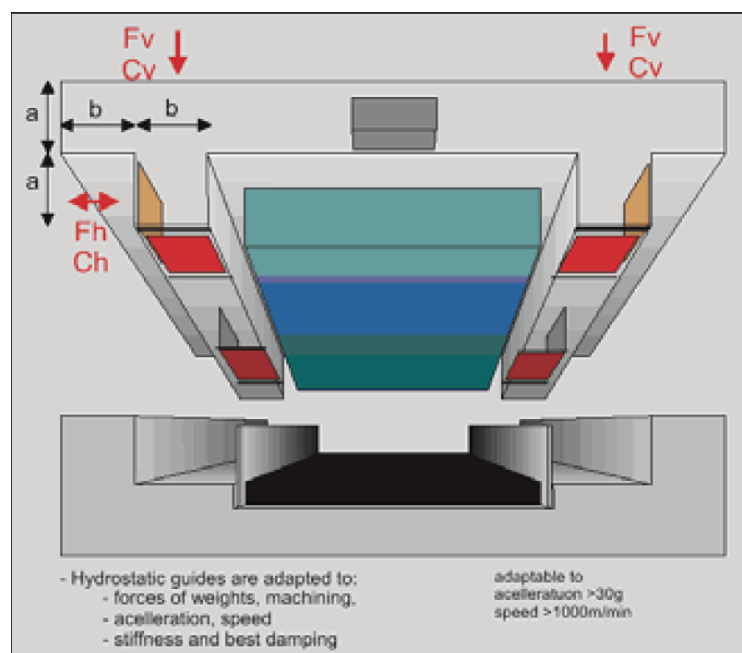
4.1.1 Valivá uložení

Valivá vedení většinou využívají valivých elementů – kuličky a válečky. Kuličky jsou vhodné pro nižší zatížení a vyšší rychlosti, válečky naopak pro vyšší zatížení a nižší rychlosti. U toho typu vedení dochází k opotřebení, ale výměna i údržba neznámá většinou velké komplikace. Mnoho výrobců dodává kompletní sestavy, které se pouze po čase vymění za nové. Mezi hlavní nevýhody valivého vedení patří nízké tlumení z důvodu kontaktu kov-kov. Tento jev lze zmírnit za pomoci polymerů a oleje. Jde o nejvíce rozšířené vedení v oblasti obráběcích strojů, nicméně super-přesné obrábění vyžaduje co největší tlumení a co největší rychlosti, což mohou zajistit pouze tekutinová vedení. [11]

4.1.2 Kluzná uložení

Hydrostatická

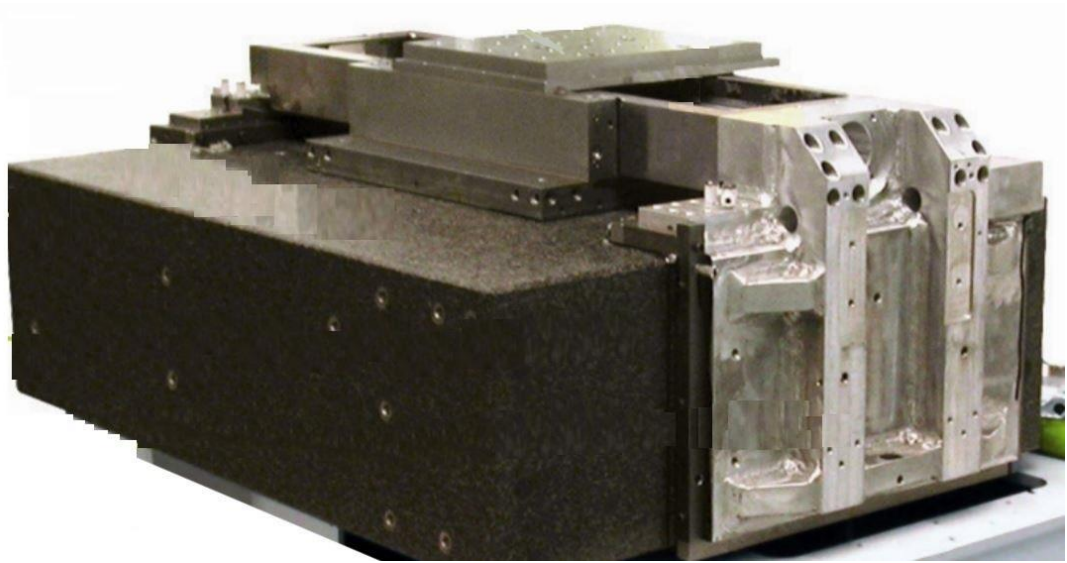
U hydrostatického vedení (Obr. 13) odděluje povrch vedení a saní olejová vrstva. Na rozdíl od mechanických typů vedení nedochází k žádnému styku těchto ploch a ani opotřebení. Zajišťuje to externí pumpa, která udržuje konstantní tlak a průtok oleje. U rotačních součástí navíc dochází automaticky k centrování součásti. Hlavní výhodou je zejména velmi vysoké tlumení, nulové statické tření, malé množství generovaného tepla, které je navíc odváděno protékajícím olejem, a vysoká nosnost úměrná tlaku oleje. [11]



Obr. 13 - Hydrostatické vedení [19]

Aerostatická

Aerostatická vedení (Obr. 14) se v mnoha ohledech podobají hydrostatickým. Olej je u nich nahrazen vzduchem a stejně jako u hydrostatických vedení je externím čerpadlem udržován při konstantním tlaku. Z důvodu nízké viskozity vzduchu se u nich neprojevují třecí ztráty ani při vysokých rychlostech. Zároveň není potřeba řešit cirkulaci jako u oleje, protože se může používat stále nový vzduch z okolního prostředí. Hlavní nevýhodou aerostatického vedení je nízká tuhost způsobená vysokou stlačitelností vzduchu, což zároveň znamená nízkou schopnost tlumení. U přesných center se přesto využívají, protože řezné síly bývají malé. [11]



Obr. 14 - Aerostatické vedení na granitovém loži [20]

5 Pohony

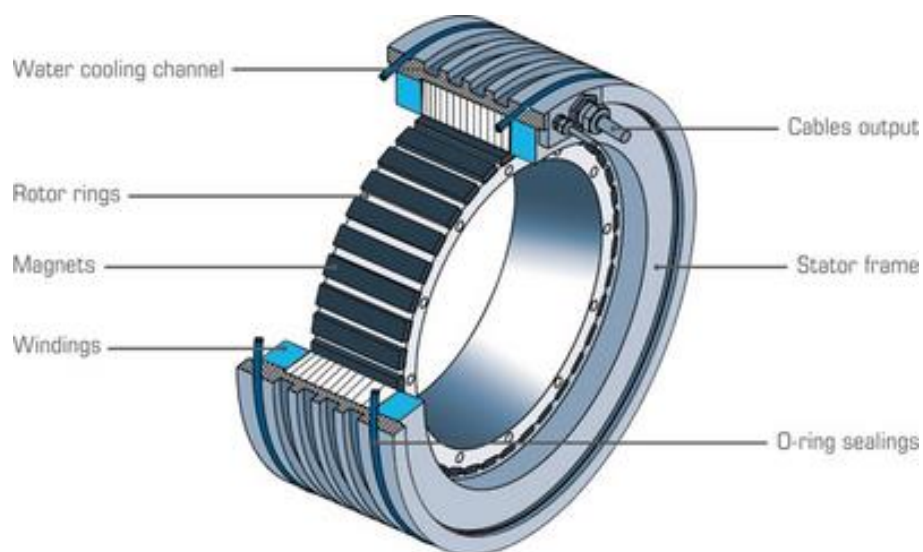
Pohony zajišťují pohyb stolu a vřetene při obrábění. Každá osa má obvykle svůj vlastní pohon, který pracuje nezávisle na ostatních. Existuje několik typů pohonů a jejich volba závisí zejména na použitém vedení, frézovací metodě, hmotnosti obrobku a požadovaných rychlostech. Zásadní rozdíl je mezi pohony posuvných a rotačních os. [21]

5.1 Typy pohonů

Základní rozdělení pohonů frézovacích center je pro osy posuvné a osy rotační. Z konstrukčního hlediska bývá jednodušší vyvinout pohyb rotační, avšak s vývojem tzv. DD motorů (direct drive motorů) se tento rozdíl výrazně zmenšil. Tyto motory, rotační i lineární, jsou přímo napojeny na zátěž. Odpadá tím nutnost mechanického přenosu výkonu z motoru na místo se zátěží. Zároveň se zmenšuje počet prvků ovlivňujících přesnost. V následujících podkapitolách jsou popsány principy fungování pohonů včetně jejich výhod a omezení. Přesnost pohonů ovlivňuje zejména řídicí technika, citlivost senzorů, rozlišení enkodérů a naladění řídicích algoritmů. [22]

5.1.1 Pohony rotačních os

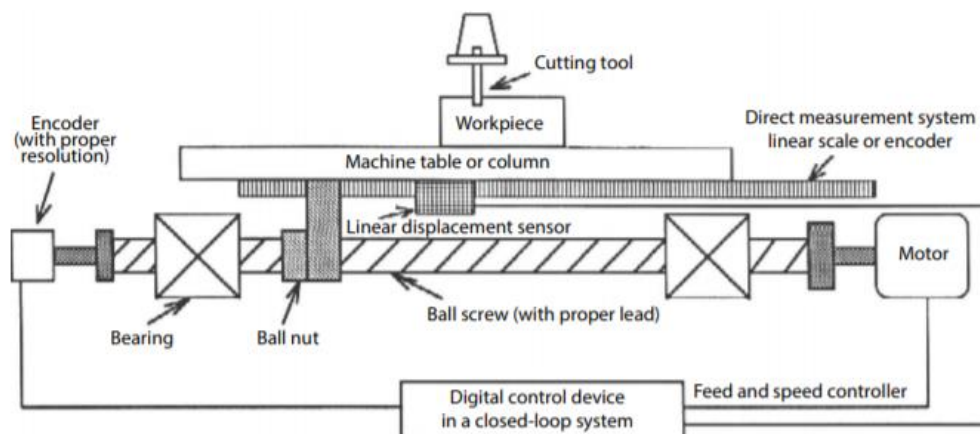
Prstencové motory (Direct drive rotary motors) (Obr. 15) fungují na podobném principu jako klasické elektromotory, mají však veliký počet pólů. Stator funguje jako elektromagnet a rotor je tvořen permanentními magnety. Při takovém konstrukčním řešení není potřeba kartáčů uzavírajících běžný rotorový indukční obvod a nedochází k opotřebení jinde než na ložiskách. Znamená to zjednodušení údržby a možnost dosažení vyšších rychlostí. Na rozdíl od jiných motorů dosahují maximálního momentu téměř nezávisle na rychlosti, která bývá obvykle nižší než 1000 ot/min. I proto bývají řazeny podle kroutícího momentu, nikoliv výkonu. [11, 23]



Obr. 15 - Prstencový motor [23]

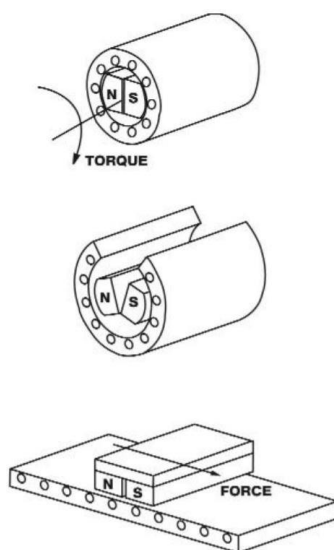
5.1.2 Pohony posuvných os

V této bakalářské práci rozlišujeme tyto typy pohonů posuvných os: lineární motory, elektrické motory a vodící šrouby. Vodicí šroub není přímo pohonem, ale v této kapitole jsou vodící šrouby zařazeny, aby se odlišilo vedení výkonu z motoru od vedení saní, které má funkci pouze držet saně ve směru osy. Schéma pohonu posuvné osy je zobrazeno na obrázku 16. [2]



Obr. 16 - Schéma pohonu posuvné osy [2]

Lineární motory (Linear direct drive motors) vykazují ze všech typů pohonů nejvyšší zrychlení a zároveň vysoké rychlosti. Konstrukčně si je lze představit jako rozvinuté prstencové motory (Obr. 17). Jejich přesnost není ovlivněna vzdáleností jako u kuličkového šroubu. Využívají permanentní magnety nebo elektromagnety. Motory s elektromagnety bývají spolehlivější a celkově vhodnější. V porovnání s mechanicky řízenými posuvy mohou být až dvakrát rychlejší a stejně či více přesné. Srovnávané stroje v této rešerši většinou používají právě tento typ motorů. Nevýhod lineárních motorů je několik, například velké množství generovaného tepla či nízká tuhost. Z toho důvodu jsou proto všechny omezené řeznou silou a nosností. Větších sil lze dosáhnout při zapojení několika motorů paralelně, ale u přesných center bývají řezné síly velmi malé. Při obrábění železných materiálů mohou nastat komplikace z důvodu vysoké permeability železa. [2, 21]



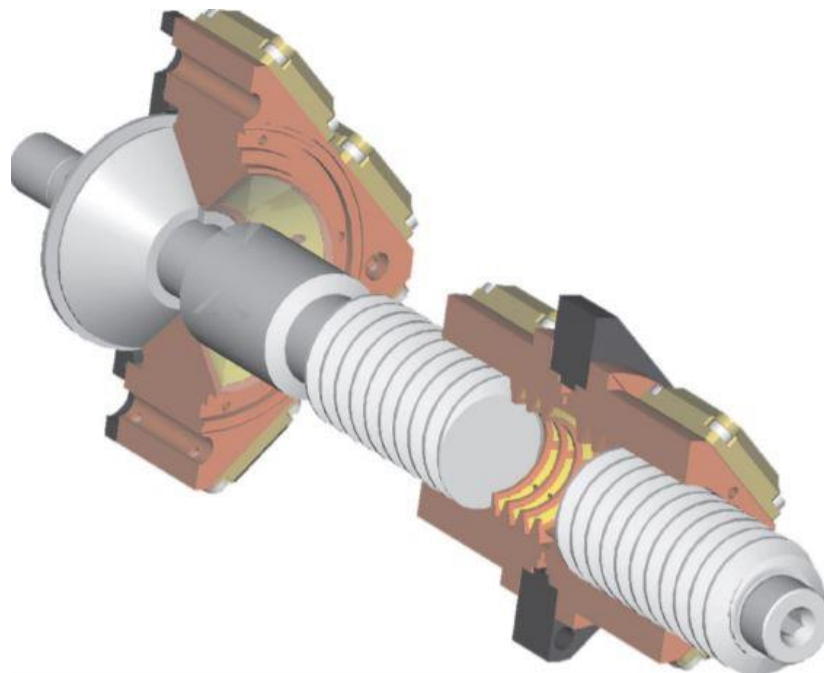
Obr. 17 - Lineární motor [24]

Elektrické motory představují nejrozšířenější skupinu pohonů a lze je využít téměř ke všem frézovacím operacím. Samotný motor není tolik důležitý jako způsob přenosu energie z motoru. Elektrické motory jsou snadnější na konstrukci, protože nevyžadují složité konstrukční řešení a ochranu před negativními vlivy magnetického pole jako lineární motory. Silné magnetické pole u lineárních motorů ovlivňuje nejen odvod třísek, ale i zatížení vedení, které bývá až třikrát větší než od ostatních silových účinků. Rotační pohyb se musí transformovat na posuvný. To zajišťuje vodící šroub. [2, 25]

Vodící šrouby jsou obvykle poháněny servomotorem (elektrický motor) a klasifikujeme je takto:

- závitové vodící šrouby,
- kuličkové vodící šrouby,
- hydrostatické vodící šrouby. [21, 25]

Kuličkové šrouby jsou nejrozšířenější druh vodících šroubů u běžných obráběcích center. Protože u nich dochází ke tření a otěru, musí se pravidelně měnit, a to znamená další náklady. Lepší alternativu k nim představují šrouby hydrostatické (Obr. 18), které dosahují vyšší přesnosti a zároveň v nich nedochází k opotřebení materiálu a mají tak teoreticky neomezenou životnost. Jejich nevýhodou je složitější provoz a nutnost dodržovat protékající olej pod konkrétním tlakem. [2, 21, 25]



Obr. 18 – Hydrostatický vodící šroub [24]

Za zmínku rovněž stojí energetická náročnost těchto pohonů, včetně chlazení a údržby. Typický hydrostatický vodící šroub pro vysoké rychlosti potřebuje pro provoz zhruba 2 litry oleje za minutu při tlaku 50 bar. K pohonu jeho kompresoru a servomotoru je potřeba celkový výkon 0,75 kW. Oproti tomu lineární motor se stejnými požadavky na řeznou sílu a posuv vyžaduje výkon zhruba desetkrát vyšší, protože je nutno odvádět velké množství tepla a samotný chladič vyžaduje výkon 2 kW. Při výběru stroje by se proto mělo zvážit i energetické hledisko, zejména v případě, kdy by měl stroj pracovat v třísměnném provozu nebo pokud je lineárních motorů pro potřeby vyšších sil ve stroji více. [25]

V současné době jsou vyvíjeny kombinované pohony složené jak ze šroubového pohonu, tak lineárního motoru. Pomocí šroubu lze obrábět na delších vzdálenostech a lineární motor zajišťuje rychlejší pohyby a také vyšší přesnost. [2]

6 Běžná frézovací centra a přesná frézovací centra

Přesná centra se od běžných liší zejména v cílových segmentech průmyslu. Největší využití nacházejí v elektrotechnických a vojenských aplikacích. Dosahované drsnosti se pohybují v řádech desítek nanometrů, ale velice záleží na vlastnostech obráběného materiálu a tvaru plochy. Užití například v automobilovém průmyslu by nebylo konkurenceschopné z důvodu vysoké ceny a nevhodnosti pro hromadnou výrobu. Rozdíl v přesnosti by u některých součástí prakticky neměl vliv na hlavní funkci a znamenal by pouze vyšší náklady.

Základními rysy všech velmi přesných center jsou lineární motory a výše popsáný typ upínání HSK, který se využívá u velmi vysokých rychlostí vřetene řádově nad 20 000 ot/min. Výjimky představují například stroje Pyramid Nano od firmy Kern a Prázoplan od firmy Mauser-Krause z důvodů podrobněji rozepsaných dále.

Hmotnosti obrobku se pohybují v řádech desítek kilogramů a počet strojů nabízených světovými výrobci se pohybuje v jednotkách. Rozdíly běžných a přesných center jsou shrnuty v tabulce 1.

Tab. 1: Přesná a vysoce přesná centra

Parametry	Přesná frézovací centra	Vysoce přesná centra
Segment průmyslu	energo, letectví, automotive, výroba forem	fotonika, optomechanika, vojenství, elektronika
Otáčky	do 30 000 ot/min	40 000 až 100 000 ot/min
Typ uložení	valivé	aerostatické, hydrostatické
Konstrukce lože	lité, svařované	granitové (single frame)
Polohování os	kuličkové šrouby	lineární motory
Teplotní kompenzace	kompenzační čidla	temperace lože a stolu, 2x zpětnovazební snímání polohy
Přesnost polohování	jednotky μm	desetiny μm
Inkrement polohování XYZ	1 μm	0,1 μm
Maximální průměry nástroje	200 mm	40 mm
Maximální hmotnosti obrobku	jednotky stovek kg	jednotky desítek kg
Počty modelů strojů	stovky	jednotky
Výrobci, jednotlivé modely	Mazak, Okuma, Hermle, DMG, Fehlmann, Mitsubishi, Hurco, Datron, TriMill, Matsuura, Fanuc	MIKRON Mill S 500 MAUSER Prázoplan YAZDA YMC 430 MAKINO iQ300 KERN Pyramid Nano KUGLER Micromaster 3/5X

K tabulce 1 je vhodné uvést alespoň jednoho zástupce každé kategorie. Za běžně používaná centra bylo zvoleno ACE Center MB – 46VA od společnosti Okuma. Parametry vysoce přesných center jsou znázorněny na příkladu stroje Pyramid od firmy Kern. Konkrétní srovnání strojů je provedeno v tabulce 2. Rozdíl hmotností je způsoben zejména jiným typem lože, protože granitové lože bývá masivní a těžší než litinové.

..

Tab. 2: Srovnání přesného a velmi přesného frézovacího centra [26, 27]

		ACE Center MB – 46VA	Kern Pyramid
Rozsah v ose x	mm	560	500
Rozsah v ose y	mm	460	500
Rozsah v ose z	mm	460	400
Rychlost ve směru osy x	m/min	32	25
Rychlost ve směru osy y	m/min	32	25
Rychlost ve směru osy z	m/min	32	25
Materiál lože	-	litina	granit
Vedení	-	valivé	hydrostatické
Hmotnost	kg	6000	8100
Vřeteno			
ot/typ/výkon(kW)	-	25 000/HSK-40/15(S1)	50 000/HSK-25/6,4(S1)
ot/typ/výkon(kW)	-	-	42 000/HSK-40/11(S1)
Zásobník nástrojů			
počet/typ	-	20/32/48(HSK-40)	32/64/96(HSK-25)
počet/typ	-	-	25/50/75(HSK-40)
Přesnost			
Inkrement zadávání	μm	1	0,1
Absolutní přesnost	μm	± 2,3	± 0,4
Opakovatelnost	μm	± 1	± 0,3

6.1 Výrobci přesných obráběcích center

V zadání bakalářské práce je průzkum trhu tříosých a pětiosých přesných frézovacích center. Celkem bylo vybráno 6 společností, které nabízejí frézovací centra s parametry super-přesných center. Dále jsou představovány a srovnávány stroje těchto společností:

- Mikron,
- Krause-Mauser,
- Yasda,
- Makino,
- Kern,
- Kugler.

Výrobci obvykle frézovací centra uvádějí v řadách odstupňovaných podle velikosti a výkonu stroje. Z důvodu široké nabídky u některých výrobců je z konkrétní řady vybrán vždy jeden zástupce. Ostatní stroje ve stejné řadě mají srovnatelné kvalitativní parametry a není potřeba porovnávat všechny.

6.2 Třiosá centra

Níže je uvedeno srovnání tříosých obráběcích center. Někteří výrobci nabízejí centrum se stejným označením s 3, 4 i 5 osami (např. Kugler) a možností přidání či odebrání os operátorem, jiní se naopak v oblasti super přesného obrábění specializují pouze na tříosé stroje.

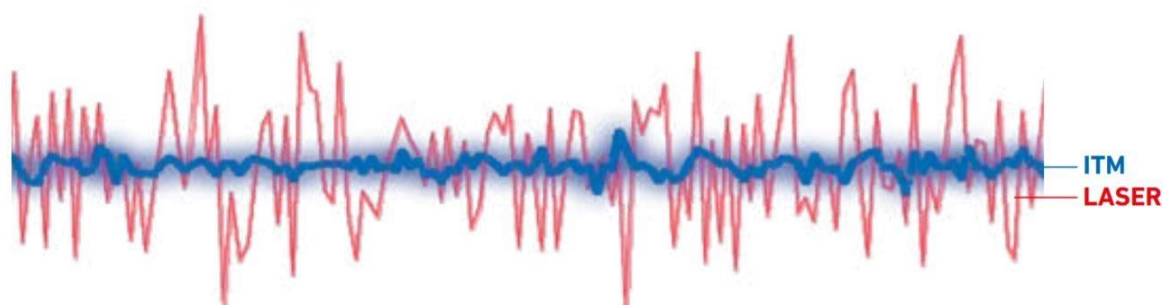
Makino – řada iQ300

Ve firemním katalogu lze sice nalézt rozsáhlou nabídku pětiosých center, ale žádné z nich nelze zařadit mezi velmi přesná centra. Tato skutečnost by měla být zvažena při výběru centra podle plánovaného využití, protože pětiosá centra nabízejí mnohem větší univerzálnost. Po neúspěšných pokusech získat informace přímo od výrobce byly informace získány od externího prodejce. [28, 29]

Pouze u tohoto stroje lze nalézt rozdělení přesnosti na garantované a dosažené. Tento fakt je zohledněn v tabulce 3, první hodnota znamená přesnost garantovanou výrobcem a druhá je přesnost naměřená. Této přesnosti stroj dosahuje i přesto, že jako jediný ze všech srovnávaných používá valivá vedení. [28, 29]

Mikron Mill S 500

Základními prvky jsou lineární motory a upínací systém HSK, což je obvyklé i u jiných srovnávaných strojů. Tento stroj se odlišuje tím, že jako jediný ze srovnávaných strojů má lože z Granitanu. Vedle propracovaného systému chlazení je v katalogu pokládán důraz zejména na kalibraci nástroje a kontroly i v průběhu obrábění. ITM (intelligent tool monitoring) za pomoci moderních senzorů snímá celý břit nástroje. Na obrázku 19 lze vidět srovnání kalibrace pomocí laseru a metodou ITM. Výrobce garantuje dosahovanou přesnost nástroje menší než 2 μm . Společnost provádí kalibraci každého stroje zvlášť při výstupní kontrole. Vřeteno je uloženo v ložiskách s keramickými valivými elementy, podrobněji popsaných v kapitole 3. Výrobce nabízí několik možností automatizace pomocí palet, ale při jejich použití klesne celková užitná hmotnost z důvodu zatížení od palet. V katalogu je rovněž podrobně rozepsáno nakládání s třískami a nabízený doplňkový sortiment filtračních zařízení a nádob pro chladicí a čistící kapaliny. [17]



Obr. 19 – ITM (intelligent tool monitoring) [17]

Ani přes opakované pokusy se spojit s produktovým oddělením firmy Mikron se nepodařilo získat podrobnější informace. Bylo by nespravedlivé nezahrnout tuto společnost do celkového srovnání, neboť mohlo dojít k pochybení ve výběru adresáta dotazů. Konkrétní hodnoty dosahované přesnosti a opakovatelnosti se však proto nepodařilo dohledat. [17]

Výsledná přesnost vždy závisí na náročnosti obrábění. Nejlepších výsledků u drsnosti a rozměrové přesnosti je dosahováno na rovných plochách. Například u měděné elektrody výrobce uvádí rozměrovou přesnost $\pm 4 \mu\text{m}$ a tato přesnost je součtem přesnosti polohování a břítu nástroje. [17]

Mauser-Krause Prazöplan

Prázöplan není v této práci zařazen do srovnání s pětiosými centry, ačkoliv je v katalogu zmíněna možnost přidat 4. a 5. osu. Tato skutečnost je způsobena konstrukcí stroje a na obrázku 14 lze vidět, že je centrum koncipováno primárně jako tříosé s rovnou plochou pro upnutí obrobku bez dalších rotačních os. Tento stroj se navíc v několika ohledech liší od ostatních srovnávaných strojů v této rešerši. Hlavní dva rozdíly jsou rozsah os a typ vedení. Rozsah os u stroje Prazöplan je ve všech směrech 300 mm, ale u ostatních se rozsahy os pohybují okolo 500 mm. To znamená větší omezení pro rozměry obrobku a při výběru by mělo být zohledněno. [20, 30, 31]

Prazöplan využívá rovinné (planar) vedení (Obr. 14). U frézovacích strojů běžně platí, že jsou jednotlivé osy skládány na sebe. To však znamená nejen sčítání chyb polohování každé z os, ale také změnu polohy těžiště. U rovinného vedení dochází k polohování osy x a osy y zároveň. Saně jsou velmi tuhé a plovou na vzduchovém polštáři přes lapované grafitové lože. Díky tomu dochází ke krátkému přenosu sil přímo ze saní do konstrukce stroje. Výsledná přesnost je odvozena od přesnosti lože, u kterého výrobce uvádí hodnotu tolerance rovinnosti

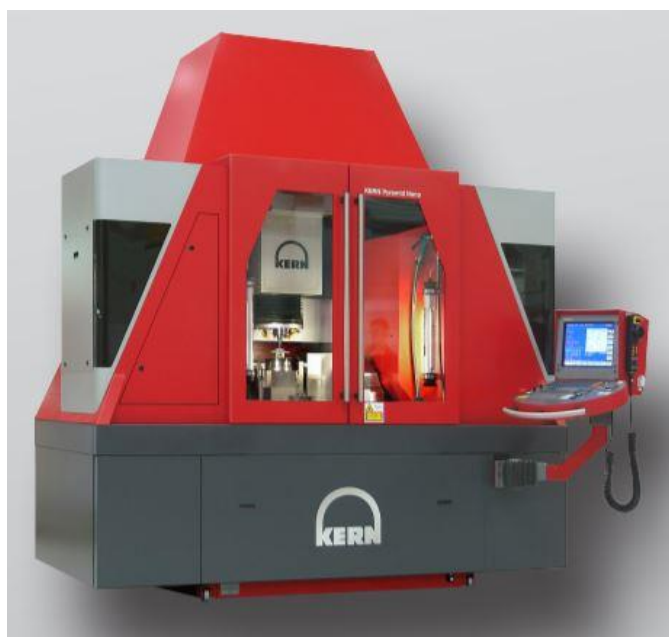
1 μm . Jako jediné tříosé frézovací centrum ze všech srovnávaných používá aerostatické vedení. [20, 30, 31]

6.3 Pětiosá centra

Většina pětiosých center nabízí možnost odebírání os a lze je tedy využívat k tříosému obrábění. Srovnání lze proto provádět i mezi pětiosými a tříosými stroji, ale pro přehlednost jsou stroje odděleny. Odebírání os se provádí pouze tehdy, pokud je potřeba větší pracovní prostor nebo pokud je obrobek velmi těžký.

Kern Pyramid Nano

Svým vnějším designem se velmi odlišuje od ostatních srovnávaných strojů. Název je odvozen od charakteristického tvaru (Obr. 20). Tento stroj se od ostatních liší pohonem os a materiálem lože. K pohonu posuvných os se využívá hydrostatického vodícího šroubu. Firma Kern uvádí mezi výhodami tohoto pohonu přesnější polohování než u lineárních motorů. Lože je vyrobeno z materiálu zvaného *Kern Armorith*, na který má firma vlastní patent. Každý stroj obsahuje robotický manipulátor, což umožňuje lepší automatizaci po případném propojení externích dopravníků. Výrobce také nabízí jako doplňující vybavení brusku, ale kvalita povrchu při velmi jemném frézování je často dostatečná a není potřeba dalších dokončovacích operací. [27]



Obr. 20 – Kern Pyramid Nano [27]

Yasda YMC 430

V oficiálním katalogu firmy Yasda lze o tomto stroji nalézt mnoho podrobných informací, včetně dosahovaných přesností v každé ose samostatně a pro kruhovou interpolaci. Pro hodnoty přesností jsou vybrány vždy nejméně přesné výsledky. Například pro osu y výrobce udává absolutní přesnost 0,6 μm , pro osu x 0,5 μm a 0,4 μm pro osu z. Ve výsledné tabulce 3 je použita hodnota 0,6 μm . Opakovatelnost ve všech osách je stejná, a to 0,1 μm . Společnost nabízí základní vřeteno s maximálními otáčkami 40 000 otáček za minutu a také variantu s rozsahem otáček až do 80 000 otáček za minutu s aerostatickým uložením. V porovnání s mechanickým uložením výrobce uvádí zvýšení přesnosti až o polovinu. [34]

Kugler – řada Micromaster 3/5X

Posledním srovnávaným frézovacím centrem je Micromaster 3/5X společnosti Kugler (Obr. 21), ke kterému obchodní oddělení ochotně dodalo mnoho technických údajů. Disponuje podobnými vlastnostmi jako ostatní stroje, ale dosahuje velmi dobrých výsledků z hlediska přesnosti. Lože z přírodní žuly neboli granitu chrání před projevem teplotní dilatace. Vřeteno má aerostatické uložení a výrobce neuvádí možnost použití jiného vřetena než pneumatického HSK-E25 s rozsahem 500 – 80 000 otáček za minutu. [35, 36]

Pro obrábění optických povrchů lze vyměnit naklápací osu za rotační stůl, což výrobce přímo doporučuje z důvodu vysoké nosnosti stolu a přesnějším dosahovaným výsledkům včetně kvalitnějšího povrchu. Zajímavostí je mimo jiné například signalizační světlo, které mění barvu podle typu operace stroje. [35, 36]



Obr. 21 - Kugler Mikromaster 3/5X [36]

7 Vyhodnocení

Srovnávané stroje lze hodnotit ve dvou rovinách, a to z hlediska přesnosti a univerzálnosti. Pro účely srovnání byly použity pouze parametry získané pro všechny srovnávané stroje, protože některé katalogy byly podrobnější než jiné. Pokud výrobce uváděl výsledky při konkrétních aplikacích, tak se jednalo o rozdílné obrobky s různou náročností obrábění a srovnávání takových výsledků by mohlo být značně nepřesné a zavádějící.

Přesnost

Objektivně lze hodnotit pouze přesnost pozicování os, protože výsledná rozměrová přesnost na obrobku záleží na mnoha podmínkách včetně složitosti plochy a opotřebení nástroje, které je sice monitorováno, ale obvykle s určitou tolerancí. Z hlediska přesnosti pozicování os lze z níže uvedené tabulky 3 určit za nejlepší stroj společnosti Kugler s dosahovanou absolutní přesností v rozmezí $\pm 0,3 \mu\text{m}$ a opakovatelností $\pm 0,05 \mu\text{m}$. Hodnoty uvedené v katalogu výrobce se v tomto bodě rozcházejí s údaji poskytnutými přímo společností Kugler. V informacích zaslaných přímo výrobcem je uvedena absolutní přesnost až v rozmezí $\pm 0,25 \mu\text{m}$. Na pomyslné druhé místo by se zařadila společnost Kern s absolutní přesností $\pm 0,4 \mu\text{m}$ a opakovatelností $\pm 0,3 \mu\text{m}$. Společnost zaslala pouze jednu hodnotu přesnosti s vysvětlením, že používají jiné rozlišování. Absolutní přesnost byla dohledána z externího zdroje. Firma Makino jako jediná rozlišuje přesnosti garantované a dosahované. To je velice důležité, protože společnosti často uvádějí pouze naměřené hodnoty ve vlastních podmínkách a negarantují stejnou přesnost po dodání k zákazníkovi. U společností Mikron se nepodařilo dosahované přesnosti získat vůbec. Srovnání přesností všech center je uvedeno v tabulce 3.

Tab. 3: Srovnání center podle přesnosti [27, 28, 30, 34, 35]

Přesnost		Kugler	Kern	Makino	Yasda	Mikron	Mauser
Absolutní přesnost	μm	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 1 / \pm 0,4$	$\pm 0,6$	-	± 1
Opakovatelnost	μm	$\pm 0,05$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5 / \pm 0,1$	$\pm 0,1$	-	$\pm 0,4$

Univerzálnost

U srovnávaných strojů je největší důraz kladen na přesnost, ale je důležité zohlednit rovněž možnosti přizpůsobení konkrétním požadavkům na výrobu. Z tohoto důvodu lze z hodnocení rovnou vyloučit všechna tříosá centra, která neumožňují výrobu tak složitých ploch jako centra pětiosá. Někteří výrobci nabízejí široké množství doplňujícího sortimentu,

například rozšíření nástrojové kapacity, robota nahrazující manuální práci operátora, případně různé typy palet pro lepší možnosti automatizace. Posuzování frézovacích strojů podle kritéria *univerzálnost* je velmi složité, protože informace v katalogích nejsou jednotné a výrobci nabízejí možnost domluvy pro konkrétní požadavky. Zásadním kritériem univerzálnosti je typ a možnosti vřetene. Vřetena srovnávaných frézovacích center jsou podrobněji popsána v dalších odstavcích.

Výrobci nabízejí vřetena s několika průměry upínače, ale někteří v oficiálním katalogu uvádějí pouze jedno s možností dotázání pro konkrétní požadavky. Všechna centra používají upínací systém HSK. Číslo v označení značí vnější upínací průměr, nikoliv průměr nástroje. Například u HSK-E25 se průměr nástroje pohybuje od 3 do 12 mm. Někteří rovněž nabízejí možnost výběru mezi elektrickým a pneumatickým pohonem. Otáčky vřeten všech srovnávaných strojů se pohybují mezi 30 a 80 tisíci otáček za minutu. Yasda 430, Kugler Micromaster a Mauser Präzoplan umožňují využití pneumatického vřetena dosahující 80 000 otáček za minutu a obecně platí, že vyšší otáčky znamenají menší drsnost povrchu.

Vzhledem k vysokým otáčkám pneumatických vřeten by se mohlo předpokládat, že nejlepší kvality povrchu budou dosahovat pouze centra s pneumatickými vřeteny, ale takový závěr by byl mylný. Například společnost Kern pneumatické vřeteno nepoužívá, ale všechny hybné části stroje fungují na hydrostatickém uložení. Jako jediná společnost využívá hydrostatické vodící šrouby s možností vysokého tlumení vibrací, a i s elektrovřetenem lze proto dosahovat vysoké kvality povrchu. Vlastnosti vřeten srovnávaných center jsou podrobně rozepsány v tabulkách 4, 5.

Tab. 4: Srovnání vřeten pětiosých center [27, 34, 35]

Vřeteno (5-osé)	Kugler	Kern	Yasda
ot/typ/výkon	80 000/HSK-25/2,7(S1)	50 000/HSK-25/6,4(S1)	80 000/HSK-25/2,3(S1)
ot/typ/výkon	-	42 000/HSK-40/11(S1)	40 000/HSK-32/7,5(S1)

Tab. 5: Srovnání vřeten tříosých center [17, 28, 30]

Vřeteno (3-osé)	Makino	Mikron	Mauser
ot/typ/výkon	45 000/HSK-32/9,5	60 000/HSK-32/8,5(S6)	80 000/HSK-25/5,5(S6)
ot/typ/výkon	-	42 000/HSK-40/13,5(S6)	35 000/HSK-40/8(S6)
ot/typ/výkon	-	30 000/HSK-40/13,5(S6)	-

V tabulkách 6 a 7 jsou srovnány zásobníky nástrojů jednotlivých strojů. Vyšší kapacita pro nástroje znamená širší možnosti obrábění bez zásahu obsluhy. Samotná automatická výměna prováděná strojem nástroje trvá pouze několik vteřin.

Tab. 6: Srovnání zásobníků nástrojů pětiosých center [27, 34, 35]

Zásobník nástrojů (5)	Kugler	Kern	Yasda
počet/typ	30(HSK-25)	32/64/96(HSK-25)	32/90(HSK-32)
počet/typ	-	25/50/75(HSK-40)	-

Tab. 7: Srovnání zásobníků nástrojů tříosých center [17, 28, 30]

Zásobník nástrojů (3)	Makino	Mikron	Mauser
počet/typ	20/40(HSK-32)	20/40 (HSK-32)	30/100/150(HSK-25)
počet/typ	-	18/36/68/168(HSK-40)	30/100/150(HSK-40)

Ze skupiny posuzovaných tříosých frézovacích strojů se jako nejvíce univerzální jeví stroj Prázoplan od společnosti Mauser-Krause, protože nabízí možnost přidání 4. i 5. osy, dva typy vřeten, včetně pneumatického s vysokými otáčkami, a velkokapacitní zásobník nástrojů.

Mezi pětiosými stroji není tak zásadní rozdíl v univerzálnosti jako u tříosých. Po zvážení všech parametrů lze za nejuniverzálnější stroj označit Pyramid od firmy Kern, protože nabízí obrábění tříosé i pětiosé bez složité konverze, automatický manipulátor s paletami pro obrobek a doplňující brusné zařízení. Doplňková bruska je plnohodnotná a díky tomu se může dosáhnout úspory místa i strojního času, protože lze frézování i dokončovací broušení provádět na jedno upnutí a není potřeba druhého stroje. Při jednom upnutí se zároveň dosahuje lepší přesnosti. Kern Pyramid rovněž nabízí největší rozsah os: 500 mm ve směrech os x a y, 400 mm ve směru osy z. Micromaster 3/5X od společnosti Kugler nabízí v osách x a y stejný rozsah, ale ve směru osy z pouze 250 mm, což značně limituje výšku obrobku. Nabízí však záměnu hydrostatických vedení za aerostatická, která umožňují dynamičtější obrábění, ale při nižší tuhosti.

Závěr

Přesná centra představují budoucnost obrábění a posouvají technologické možnosti o úroveň výš. Stále existují pouze jednotky modelů zejména kvůli specifickému využití a vysokým pořizovacím nákladům. Vývoj těchto center se zřejmě bude dále ubírat směrem ke zvyšování přesnosti, opakovatelnosti a univerzálnosti. Důležitým vývojovým cílem je také zvětšení pracovního prostoru, což by umožnilo obrábění rozměrnějších dílů. Rozměry obrobku zároveň souvisejí i s jeho hmotností, která je limitována zejména tuhostí vedení.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo porovnat přesná frézovací centra podle důležitých vlastností a ukázat v čem se super-přesná centra odlišují od běžně používaných. Byly posuzovány stroje výrobců Kern, Yasda, Mikron, Makino, Krause-Mauser a Kugler. Z hlediska posuzované přesnosti se jeví jako optimální stroj Micromaster 3/5X od společnosti Kugler a z hlediska univerzálnosti stroj Pyramid od společnosti Kern.

V průběhu práce se vyskytlo několik problémů, které by v případné navazující práci měly být zohledněny. Je důležité klást důraz na kvalitní komunikaci se společnostmi a případné získání kontaktů, jelikož někteří výrobci nemusí mít zájem na práci, která je srovnává s konkurencí. Komunikovat by měl někdo s lepší vyjednávací pozicí (např. zástupce fakulty). Největší komplikace při posuzování činila nejednotnost katalogů a odlišné parametry pro srovnávané stroje, protože uvádějí údaje o vlastnostech strojů v různém rozsahu. Například garantované i naměřené přesnosti jsou pouze v katalogu společnosti Makino, ale v jiných katalozích lze najít pouze naměřené hodnoty nebo není uvedeno o jaký typ hodnot se jedná. U naměřených přesností zároveň není podrobněji specifikováno, za jakých podmínek bylo měření prováděno. V katalogu výrobce Yasda lze navíc najít dosahované kruhovitosti při kruhové interpolaci, ale vždy na určitém průměru a pro konkrétní aplikaci. U měření kruhovitosti je zásadní také rychlost obrábění. Výkony vřeten (S1/S6) často nejsou vůbec rozlišovány. Konkrétní ukázky aplikací volí každý výrobce jinak a nelze je mezi sebou téměř srovnávat. Někteří výrobci se snaží důležité informace chránit a poskytovat pouze vážným zájemcům a zákazníkům.

Nepodařilo se zjistit veškeré informace pro vyhodnocení podle počátečních očekávání, protože některé společnosti (Mikron, Makino, Yasda) na prosbu o podrobnější informace vůbec neodpověděly. Snaha však v několika případech vedla k získání cenných informací. Celkově lze konstatovat, že se cíl bakalářské práce podařilo splnit.

Použité zdroje

- [1] BOOTHROYD, G. a W. A. KNIGHT. *Fundamentals of machining and machine tools*. 3rd ed. Boca Raton: Taylor and Francis, c2006. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 198. ISBN 9781574446593.
- [2] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, [2016]. ISBN 978-1-4665-8753-3.
- [3] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 9780195142068.
- [4] DAVIS, Joseph R. *Metals Handbook, Vol. 16: Machining (ASM HANDBOOK)*. 1. ASM International, 1989. ISBN 978-0-87170-022-3.
- [5] CBN Ball end mills. *Towa* [online]. 2019 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.towajapan.co.jp/en/products/endmill/ball/>
- [6] MÁDL, Jan, Martin VRABEC, Jiří KAFKA a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [7] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [8] 3, 4, 5 axis machining. What is the difference? *Inverse solutions, Inc.* [online]. Pleasanton, 2018 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://inversesolutionsinc.com/345-axis-machining-what-is-the-difference/>
- [9] 3 Axis CNC Mill vs 4 Axis CNC Mill vs 5 Axis CNC Mill. *Taicnc* [online]. 12. 9. 2019 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.lvcnc.com/3-axis-cnc-mill-vs-4-axis-cnc-mill-vs-5-axis-cnc-mill.html>

- [10] MAKHANOV, S. S. a Weerachai ANOTAIPAIBOON. *Advanced numerical methods to optimize cutting operations of five-axis milling machines*. New York: Springer, c2007. ISBN 978-3-540-71120-9.
- [11] LÓPEZ DE LACALLE, L. N. a A. LAMIKIZ. *Machine tools for high performance machining*. London: Springer, c2009. ISBN 978-1-84800-379-8.
- [12] PIHTILI, Hasim, ed. *Tribology in Engineering* [online]. InTech, 2013 [cit. 2020-04-26]. DOI: 10.5772/3305. ISBN 978-953-51-1126-9.
- [13] Jaké existují druhy zatížení "S"? *EMP* [online]. Slavkov u Brna [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://www.emp-slavkov.cz/faqs/jake-existuji-druhy-zatizeni-s>
- [14] SMID, Peter. *CNC control setup for milling and turning: mastering CNC control systems*. New York: Industrial Press, c2010. ISBN 9780831133504.
- [15] Lože z minerálního kompozitu. *MM spektrum* [online]. 2011, (12), 42 [cit. 2020-05-08]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/loze-z-mineralniho-kompozitu.html>
- [16] Beton a přírodní žula při výrobě loží a rámů obráběcích strojů. *MM spektrum* [online]. 2003, (5), 14 [cit. 2020-04-17]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/beton-a-prirodni-zula-pri-vyrobe-lozi-a-ramu-orablecich-stroju.html>
- [17] Mikron MILL S. In: *GF Machining solutions* [online]. 2019 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: https://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/milling/high_speed_machine/en/mikron-mill-s-u-series_en.pdf
- [18] Granite CNC Machine Base. *Fortune* [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.chinaprecisiongranite.com/precision-granite-component/granite-machine-base/granite-cnc-machine-base.html>
- [19] Hydrostatic Linear Motor Guide. *TAC Rockford* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://tacrockford.com/product/hydrostatic-linear-motor-guide/>

- [20] Präzoplan 300: Overcoming the limits. In: *Präzoplan* [online]. Oberndorf a.N. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://www.praezoplan.com/_data/container/container_15/File.7/PRAEZOPLAN_EN.pdf
- [21] Konstrukční řešení současných obráběcích strojů. *MM spektrum* [online]. 14. 3. 2007 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/konstruckni-reseni-soucasnych-obrabecich-stroju.html>
- [22] What is a linear motor – direct drive advantages. *ETEL* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.etel.ch/linear-motors/direct-drive/>
- [23] COLLINS, Danielle. What is a direct drive motor? *Linear motion tips* [online]. WTWH Media, 2018, SEPTEMBER 28, 2018 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-direct-drive-motor/>
- [24] KRAR, Steve a Arthur. *Exploring advanced manufacturing technologies*. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 0-8311-3150-0
- [25] Hydrostatic Leadscrew: Comparison of hydrostatic leadscrews to linear motors and to ballscrews in metal cutting machinery. In: *TAC Rockford* [online]. Rockford, 2007 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://tacrockford.com/pdf/240.422/240422-comparison-hydrostatic-leadscrews-linear-motors-and-ballscrews.pdf>
- [26] Vertical Machining Centers ACE CENTER MB-V series. In: *Okuma* [online]. Oguchi-cho [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://www.okuma.co.jp/english/product/vmc/>
- [27] KERN Pyramid Nano: Perfection in every dimension. In: *KERN Microtechnik: CNC Präzisions Bearbeitungszentren und Auftragsfertigung made in Germany* [online]. Eschenlohe, 2019 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: https://www.kern-microtechnik.com/wp-content/uploads/2019/02/Prospekt_KERN_Pyramid_Nano_english.pdf
- [28] IQ 300. In: *Norrma* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.norrma-ab.se/wp-content/uploads/MAKINO-FRAS-iQ300.pdf>

- [29] IQ 300 Vertical 3-Axis. *Makino* [online]. Kirchheim unter Teck, 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.makino.eu/en-us/machine-technology/machines/vertical-3-axis-4-axis/iq300>
- [30] Präzoplan. *Präzoplan* [online]. Oberndorf a.N., 2014 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.praezoplan.com/en/praezoplan/specifications/>
- [31] Machine structure. *Präzoplan* [online]. 2014 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.praezoplan.com/en/praezoplan/construction/>
- [32] GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-044534-2.
- [33] Pyramid Nano. In: *Rainford precision* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://rainfordprecision.com/wp-content/uploads/2015/05/KERN_Pyramid_Nano_english.pdf
- [34] Yasda micro center YMC 430. In: *Yasda* [online]. Okayama, 5 Jan 2018 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://yasda.com/pdfs/Yasda_YMC430%20V3.pdf
- [35] Machines and components for micromachining. In: *Kugler: Precision in a new dimension* [online]. Salem, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.kugler-precision.com/index.php?MICROMASTER--3-5X-EN>
- [36] *Technical data MICROMASTER: Technical specification. 22*. Salem, 2020.

Seznam obrázků

Obr. 1 - Sousedné a nesousedné frézování	8
Obr. 2 - Kulová fréza	10
Obr. 3 - Konzolová frézka.....	12
Obr. 4 - Stolová frézka.....	13
Obr. 5 - Portálová frézka.....	14
Obr. 6 - Ukázka čtyřosého frézovacího centra.....	15
Obr. 7 - Srovnání tří a pětiosého frézování.....	16
Obr. 8 - Propojení os s obrobkem a nástrojem.....	16
Obr. 9 - Elektrovřeten v řezu	18
Obr. 10 - Typy upínání nástrojů, zleva: BT50, CAT50, ISO30, HSK50A.....	19
Obr. 11 - Graf tlumení litiny a Granitanu	22
Obr. 12 - Lože z granitu	22
Obr. 13 - Hydrostatické vedení	24
Obr. 14 - Aerostatické vedení na granitovém loži	25
Obr. 15 - Prstencový motor.....	26
Obr. 16 - Schéma pohonu posuvné osy.....	27
Obr. 17 - Lineární motor	27
Obr. 18 – Hydrostatický vodící šroub.....	28
Obr. 19 – ITM (intelligent tool monitoring)	33
Obr. 20 – Kern Pyramid Nano	34
Obr. 21 - Kugler Mikromaster 3/5X	35

Seznam tabulek

Tab. 1: Přesná a vysoce přesná centra.....	30
Tab. 2: Srovnání přesného a velmi přesného frézovacího centra	31
Tab. 3: Srovnání center podle přesnosti.....	36
Tab. 4: Srovnání vřeten pětiosých center.....	37
Tab. 5: Srovnání vřeten tříosých center	37
Tab. 6: Srovnání zásobníků nástrojů pětiosých center.....	38
Tab. 7: Srovnání zásobníků nástrojů tříosých center	38