VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Přestavba ručně řízené frézky na CNC frézku

Conversion of manually controlled milling machine into CNC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE Petr Orság
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Kateřina Mouralová, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Petr Orság**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	**Ing. Kateřina Mouralová, Ph.D.**
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přestavba ručně řízené frézky na CNC frézku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukční návrh a realizace přestavby ručně řízené frézky na CNC frézku. Při přestavbě je kladen důraz na jednoduchost a správnou funkčnost. Je kladen také důraz na cenu komponentů a složitost úprav stávajících dílů. Práce rovněž obsahuje výpočetní řešení vybraných komponent. Závěr práce obsahuje ekonomické zhodnocení přestavby.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše dané problematiky,
návrh úprav stávající frézky,
výpočty vybraných dílů,
volba komponent potřebných k přestavbě,
ekonomické zhodnocení.

Seznam literatury:

Marek, J. (2010): Konstrukce CNC obráběcích strojů. MM publishing, Praha.

Borský, V. (1992): Obráběcí stroje. Nakladatelství VUT, Brno.

Shigley, E., Miksche, C. a Budynas R. (2010): Konstruování strojních součástí. VUTIUM, Brno.

Štulpa, M. (2006): CNC: obráběcí stroje a jejich programování. BEN - technická literatura, Praha.

Leinveber, J., a Vávra, P. (2011): Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. Albra, Úvaly.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

V první části práce je uvedená krátká rešerše zabývající modernizací starších strojů a použitých prvků. Jsou zde také uvedeny základní typy frézek. Další část této práce obsahuje popis použité frézky a její parametry. Dále jsou uvedeny výpočty a návrhy vybraných dílů použitých při přestavbě. Vzhledem k charakteru této práce zde nejsou uvedeny výpočty a návrhy všech dílů. Na konci práce se nachází ekonomické zhodnocení přestavby.

Klíčová slova

frézka, automatizace, CNC systém, modernizace, pohon

ABSTRACT

In the first part of this thesis, there is a short research dealing with modernization of old-type machines. There is also given a description of main types of milling machines. The next part includes characterization and parameters of the milling machine, that is the subject to the thesis. There are to be found designes and calculations of selected units in the following part. In consideration of the character of the thesis there are not given calculations of all units. The last part deals with economical evaluation.

Key words

milling machine, automation, CNC system, modernization, drive

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ORSÁG, Petr. *Přestavba ručně řízené frézky na CNC frézku*. Brno 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 64 s. Vedoucí práce Ing. Kateřina Mouralová, Ph. D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Přestavba ručne řízené frézky na CNC frézku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Petr Orság

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Kateřině Mouralové, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Poděkování patří rovněž mému otci, s jehož pomocí mohu projekt prakticky realizovat a s nímž jsem vedl nejednu diskuzi, z níž jsem si odnesl mnoho cenných poznatků. A v neposlední řadě mým nejbližším za psychickou podporu.

OBSAH

ABSTRAKT 4
PROHLÁŠENÍ 6
PODĚKOVÁNÍ 7
OBSAH 8
ÚVOD 10
1 Typy ručně řízených frézek 11
2 Způsoby řízení Frézek 13
2.1 Ruční řízení 13
2.2 Automatizované řízení 15
2.2.1 Tvrdá (nepružná) automatizace 15
2.2.1 Pružná automatizace 15
3 Používané komponenty pro přestavbu ručně řízených strojů na CNC 17
3.1 Vřeteno 18
3.1.1 Vřeteno s vnějším pohonem 18
3.1.2 Vřeteno s vnitřním pohonem 20
3.2 Posuvové soustavy 20
3.2.1 Posuvová soustava s posuvovým šroubem 21
3.2.2 Posuvová soustava s pastorkem a ozubeným hřebenem 22
3.2.3 Další možnosti posuvových soustav 23
3.3 Převody CNC strojů 23
3.3.1 Ozubený převod 23
3.3.2 Řemenový převod 24
3.3.3 Přímý převod 25
3.4 CNC systémy 26
3.4.1 CNC systémy zavedených výrobců 26
3.4.2 CNC systémy dalších výrobců 27
3.4.3 CNC řídicí software 27
4 Přestavba ručně řízené frézky na cnc 27
Představení stroje použitého k přestavbě 27
4.1 Demontáž dílů, tvorba modelů 29
4.2 Stanovení požadovaných parametrů stroje 30
4.3 Realizace vybraných úprav na stroji 30
4.3.1 Návrh vřetena 30
4.3.2 Návrh pohonů os 41
4.3.3 Návrh mazání 48

4.3.4 Volba řídicího systému 51
3.4 Finanční zhodnocení přestavby 52
5 Závěr 54
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 55
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ 59
SEZNAM PŘÍLOH 64

ÚVOD

Doba postupuje kupředu a s ní i trh zvyšuje své požadavky. Vyžaduje se výroba složitějších dílů s vysokou přesností, nízkou výrobní cenou. V neposlední řadě je vyžadována také vysoká produktivita. Pro tyto požadavky musí být také přizpůsobeny výrobní stroje. Starší stroje mnohdy přesností dostačují. Pokud se však nejedná o jednoúčelové stroje, nemohou těm dnešním konkurovat produktivitou. Výrobní podniky tuto situaci řeší různými způsoby. Jedním z možných způsobů je inovace strojového parku, kdy se vymění stroje starší za nové. Dalším způsobem je modernizace stávajících strojů. Modernizací je myšleno osazení klasických strojů CNC řídicími systémy a s tím související úpravy. Modernizace strojů může znamenat jen osazení stroje CNC systémem a pohony nebo také kompletní úpravu (přestavbu) stroje pro použití v počítačem řízeném režimu. Přestavba zahrnuje použití velké množství různých prvků, u nichž je potřeba znát jejich vlastnosti a použití. V případě této práce je také kladen požadavek na co nejnižší cenu použitých prvků. Cena použitých prvků však nemusí nutně znamenat horší parametry. V tomto případě je nižší cena vykoupena delší čekací lhůtou, kdy nákup neprobíhá u výrobce (resp. prodejce) ale např. v bazaru. Lze tak sehnat mírně použité nebo i nové prvky s výbornými parametry za nízkou cenu.

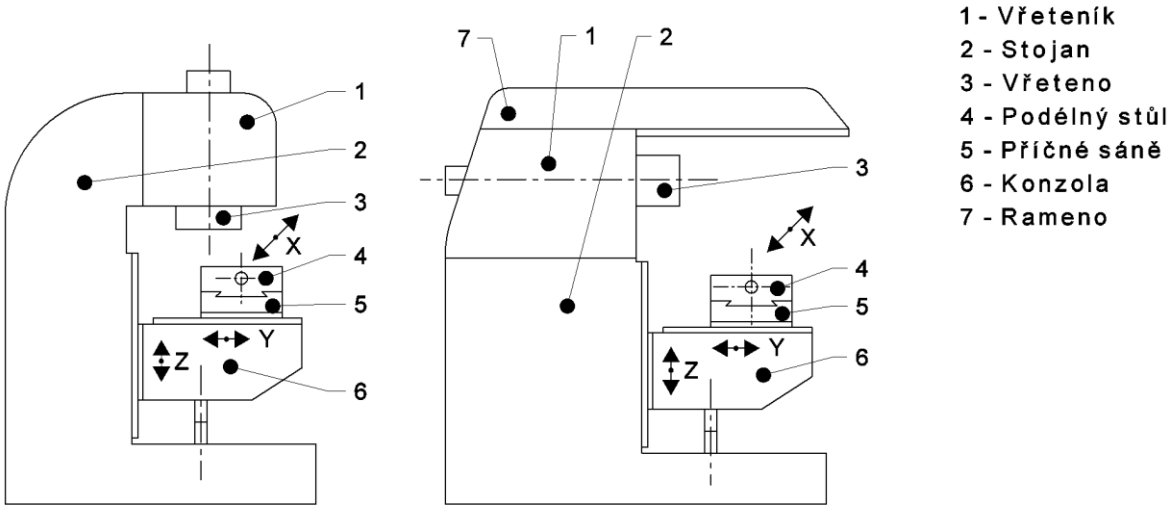
1 TYPY RUČNĚ ŘÍZENÝCH FRÉZEK

Frézky se dají rozdělit do mnoha skupin podle různých kritérií. Hlavní dva typy frézek (i všech obráběcích strojů) jsou **vertikální (svislé)** a **horizontální (vodorovné)**. Toto označení je stanoveno podle směru osy vřetene. Dále se dají rozdělit např. podle operace na frézky: hrubovací, dokončovací, gravírovací či kopírovací aj. Více informací k nalezení např. v literatuře [1, 2].

Stručné rozdělení podle konstrukce:

Konzolová frézka:

Pohyby ve svislých směrech os X a Y koná stůl, který se nachází na konzole. Konzola se pohybuje v ose Z. Tato frézka může být v provedení svislém (vertikálním) nebo vodorovném (horizontálním).



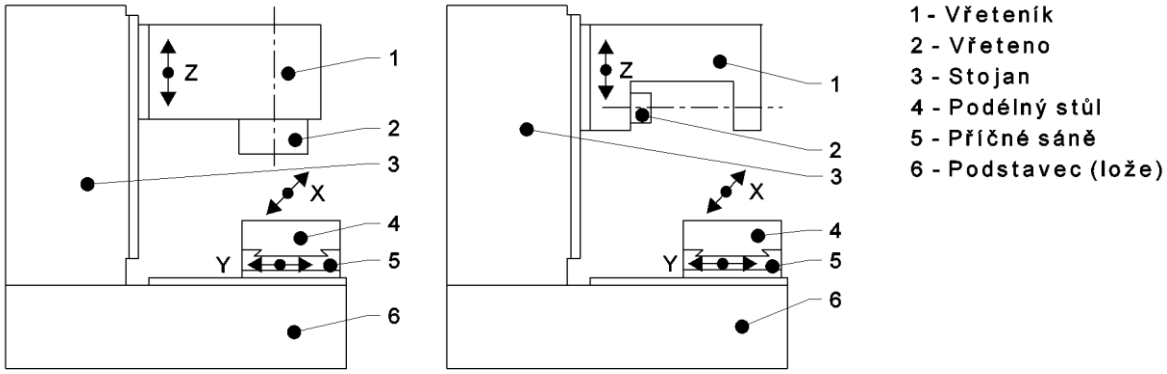
Obr. 1 Zjednodušené schéma konzolové vertikální (nalevo) a horizontální (napravo) frézky

Konzolová frézka s příčně výsuvným vřeteníkem:

Jedná se o jistou modifikaci horizontální konzolové frézky. Zde pohyby v ose Z koná konzola, na níž je umístěn stůl. Stůl se pohybuje ve směru osy X. Ve směru osy Y se pohybuje vřeteník. Tuto variantu lze často nalézt pod názvem nástrojařská, podle práce, která se na ni vykonává. Zjednodušený nákres je uveden na str. 31 (Obr. 16 a Obr. 17).

Stolová frézka:

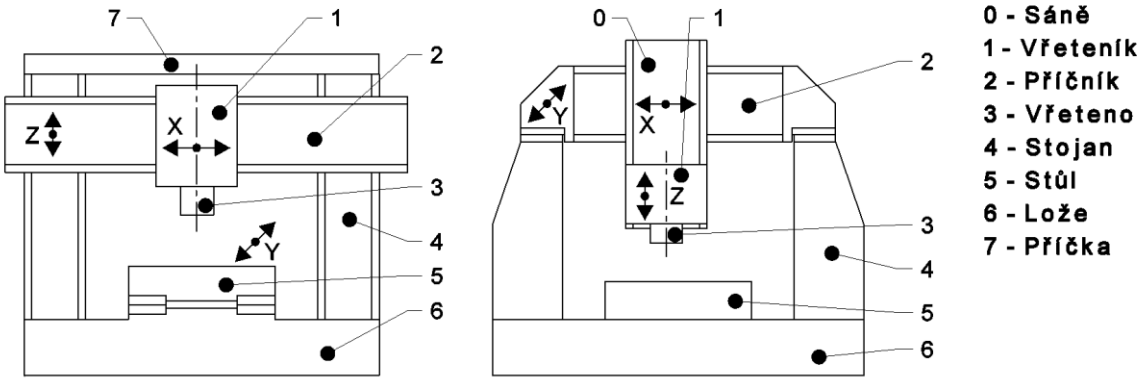
Pohyby ve vodorovných osách X a Y koná stůl. Pohyb v ose Z koná vřeteník s vřetenem. Výhodou je poměrně konstantní zatížení svislé osy, které závisí pouze na hmotnosti nástroje upnutého ve vřeteni. Obrobek se upíná na stůl, který se ve svislé ose nepohybuje. Tento typ frézky je proto vhodný pro obrábění polotovarů s velkou hmotností.



Obr. 2 Zjednodušené schéma stolové vertikální (nalevo) a horizontální (napravo) frézky

Rovinná frézka:

U tohoto typu frézek se pohybuje stůl pouze v jednom směru. Rovinné frézky také mohou být v provedení portálové se stacionárním stolem (horní, spodní gántry), kde se pohybuje portál frézky v jedné ose a vřeteník s vřetenem ve zbylých dvou osách. Popř. v provedení portálové frézky s pohyblivým stolem. Zde se stůl pohybuje pouze v jedné ose a vřeteník s vřetenem opět ve zbylých dvou osách. Stacionární zde může být portál či stojan. Tyto frézky se také běžně vyskytují ve více vřetenovém provedení. Tato vřetena mohou být jak vertikální, tak horizontální.



Obr. 3 Zjednodušené schéma portálové frézky (nalevo) a portálové frézky (v provedení horní gántry) s pevným stolem (napravo)

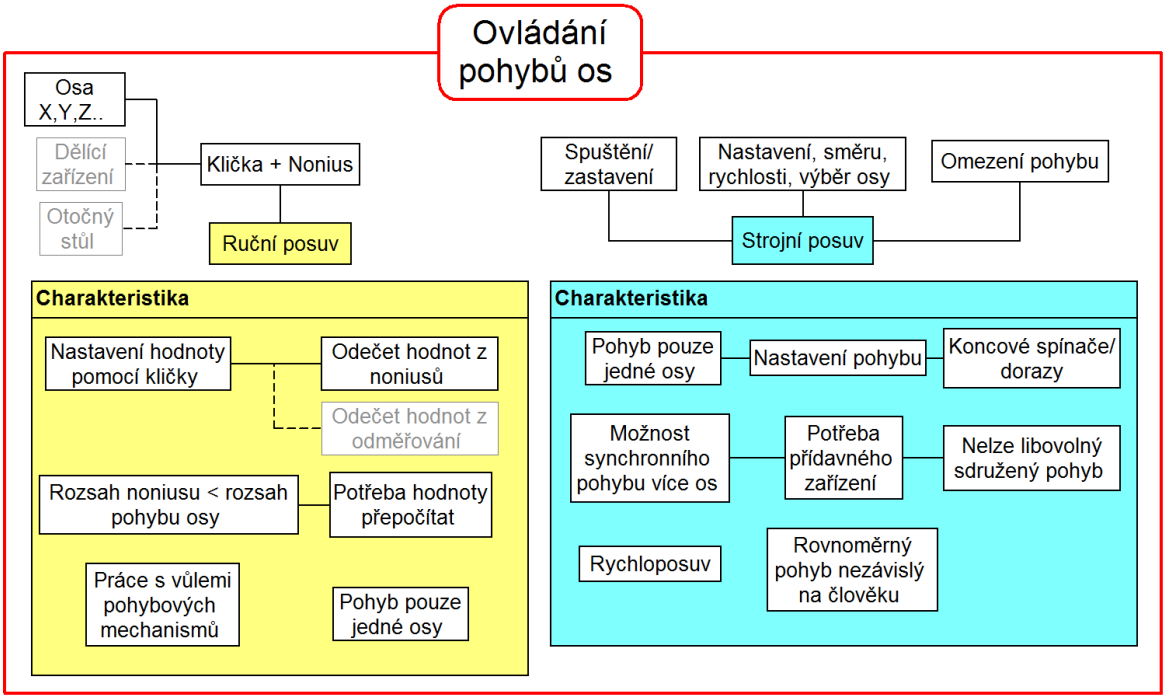
Jednoúčelová frézka:

Tato frézka jako všechny další jednoúčelové stroje je navržena pouze pro jednu operaci či jeden souhrn operací. Produktivitou se tyto stroje mohou srovnávat s CNC stroji, dokonce je i převyšovat. Velkou nevýhodou je jejich omezení v podobě jednoúčelovosti. To způsobuje menší či žádnou pružnost měnit prováděné operace. Např. frézky pro výrobu ozubených kol odvalovacím způsobem.

2 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ FRÉZEK

2.1 Ruční řízení

U tohoto řízení provádí jednotlivé po sobě jdoucí úkony vždy člověk. Všechny pohyby stroje jsou přímo závislé na člověku. Na ručním nastavení (otočení kliky, nastavení rychlosti posuvu atd.) a ručním spouštění jednotlivých prvků (spuštění vřetena, posuvu, chlazení atd.). Zjednodušená topologie tohoto řízení je zobrazena na Obr. 4 a Obr. 5.

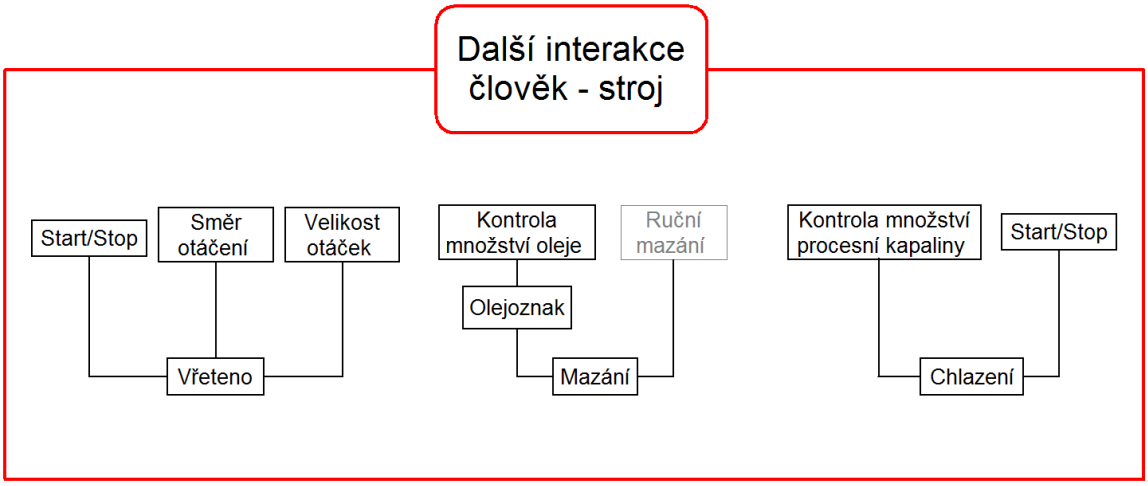


Obr. 4 Zjednodušené schéma ručního řízení

Ze schématu na Obr. 4 je patrné, že člověk obsluhující ručně řízený stroj má několik možností pohybu. Obsluha těchto stojů buď přímo nastavuje polohu pomocí otáčení kliček pohybových mechanismů, kdy pro nastavení žádaného rozměru odečítá hodnoty z noniů. Nebo může využít tzv. strojní posuv. V tomto případě obsluha nejprve nastaví rychlost posuvu a zvolí, kterou osou chce pohybovat, poté spustí strojní posuv v požadovaném směru. Rozsah pohybu lze omezit nastavením dorazů (lze dosáhnout přesného rozměru) nebo koncových spínačů resp. kostek spínajících tyto spínače (omezení posuvu pro snížení

přejezdové dráhy). Nelze však jednoduše provést sdružený posuv více os a to ani ručním ani strojním posuvem. Sdružené pohyby jsou nejčastěji umožněny pouze přídavným zařízením, např. lyrou s ozubeným soukolím (v případě výroby šroubovice pomocí dělicího zařízení apod.). Tyto sdružené pohyby jsou specifické podle prováděné operace a použitého zařízení. Přesnost výrobku závisí na přesnosti odečtu z jednotlivých noniů a znalosti chování stroje za různých podmínek. Na těchto strojích se také vyskytují vůle na pohybovém šroubu nebo na vedení. S těmito vůlemi musí umět obsluha pracovat, aby dosáhla požadovaného výsledku.

Práce na těchto strojích však nezahrnuje pouze pohyby pohybovými soustavami. Na Obr. 5 jsou zobrazeny některé další požadavky kladené na obsluhu těchto strojů.



Obr. 5 Další interakce člověk – stroj

Z obrázku je zřejmé, že obsluha nejen nastavuje další parametry (otáčky, směr otáčení vřetena) a ovládá další prvky (spuštění vřetena, spuštění chladicí kapaliny, popř. provede mazání). Ale také kontroluje stav stroje (množství oleje na různých místech, chladicí kapaliny, atd.). Provede-li tuto kontrolu chybně, na stroji lze ve většině případů pracovat bez počátečních problémů. Ty se mohou projevit až po nějaké době pracovního cyklu.

U tohoto řízení tedy vše přímo závisí na obsluze stroje. Nejen pracovní pohyby ale také kontrola stavu stroje a přesnost výrobku. V neposledním místě také na obsluze závisí výrobní čas a tím i cena výrobku. Záleží na rychlosti odečtu z noniů ale i na celkové rychlosti práce se strojem (hlavně mezioperační časy) apod. Pro sériovou výrobu je stroj nejčastěji specificky nastaven pro zvolenou operaci, popř. jsou použity speciální nástroje.

2.2 Automatizované řízení

Automatizované řízení je spojeno s rozmachem automatizace ve výrobě. Automatizace by se dala rozdělit na dvě základní oblasti. A to automatizace tvrdá (nepružná) a pružná.

2.2.1 Tvrdá (nepružná) automatizace

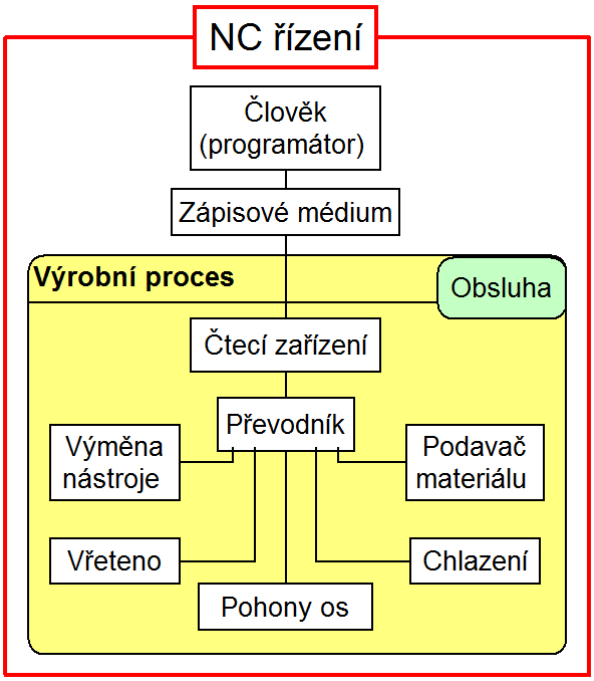
Výrobní proces této automatizace je nastaven pro maximální produktivitu (často tak může být prováděno více operací zároveň). Tvrdá automatizace se používá pro výrobu jednoho typu výrobku, který je vyráběn ve velkém množství. Je tak vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu [1, 4]. Jak už z názvu vyplývá, její nevýhoda spočívá v nepružné změně výrobního procesu. Tato změna je zdlouhavá a obtížná oproti pružné automatizaci. Při úpravě výrobního procesu proběhne výpadek výrobního stroje. Řadí se zde např. vačkové automaty, automaty řízené narážkami, dorazy atd. [1, 4].

2.2.1 Pružná automatizace

Úprava výrobního procesu je jednodušší a rychlejší než u tvrdé automatizace. V případě číslicově řízených strojů většinou není potřeba upravit, či vyměnit žádné mechanické díly, stačí upravit program. Nevýhodou pružné automatizace je nižší produktivita (záleží ovšem na složitosti dílu a na konkrétních strojích). Tato automatizace je tedy vhodná pro kusovou a malosériovou výrobu. Výhodu získává u sérií kusů, u nichž se předpokládá změna rozměrů, tvarů apod. [1, 4]. Jak již bylo naznačeno výše, do této kategorie patří především číslicově řízené stroje.

2.2.1.1 NC řízení

Zkratka NC vychází z anglického názvu Numerical Control (v překladu: číslicové řízení). Tento způsob byl značným posunem v oblasti automatizace výrobních procesů. NC řízením se z části omezil lidský faktor na rozdíl od ručního řízení. Lze tak např. získat vyšší produktivitu, kratší vedlejší časy, lepší opakovatelnost a nižší zmetkovitost [5]. Jeden nástroj je možné použít pro rozdílné operace, v mnoha případech tak není potřeba speciálních nástrojů a upínacích přípravků. Nevýhodou oproti ručnímu řízení je cenová náročnost systému (počáteční cena, cena údržby, kvalifikovaný personál apod.). Velmi zjednodušená topologie NC řízení je zobrazena na Obr. 6.



Obr. 6 Zjednodušené schéma NC řízení

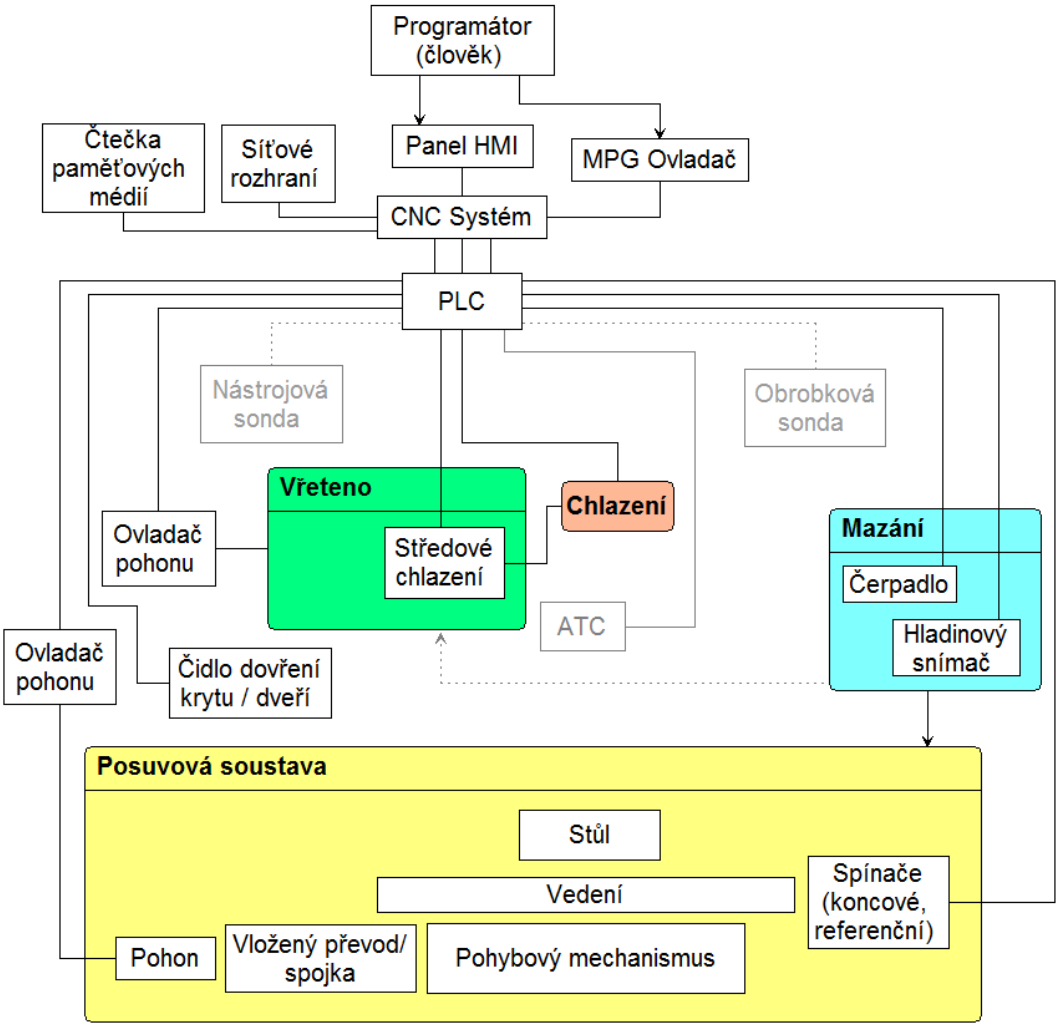
Stroje osazené NC systémy obsahují čtecí zařízení, které čte kód ze zápisového média (nejčastěji disketa nebo děrná páska). Dále je zde zařízení, které převádí tyto přečtené informace na faktické úkony, jako spínání vřetena, pohyby os apod. Samotný výrobní proces tak probíhá automaticky. Obsluha u stroje kontroluje, zda nedošlo k nějakým kolizím (např. ulomení nástroje) a případně vkládá polotovar a vyjímá výrobek. Stroje osazené NC řízením se dnes již běžně neprodukují. Nevýhodou tohoto řízení (vzhledem k modernímu způsobu řízení) je samotné záznamové médium. Především jeho pracná a omezená úprava (hlavně v případě děrné pásky).

2.2.1.2 CNC řízení

Computer Numerical Control znamená počítačové číslicové řízení. Jedná se o následovníka NC řízení. Zakomponování počítače do řízení umožňuje snazší tvorbu a editaci kódu. Pro programování CNC strojů se využívá v našem prostředí tzv. ISO kód. Princip ISO kódu je velmi podobný děrné pásce, kde jednotlivé dírky představují příkazy. ISO kód obsahuje znaky, které rovněž znamenají různé příkazy (např. spuštění vřetena doprava, spuštění chlazení apod.). Příkazy pak počítač zpracovává a převádí na fyzické úkony. Zjednodušená topologie CNC řízení je zobrazena na Obr. 7 (str. 17).

3 POUŽÍVANÉ KOMPONENTY PRO PŘESTAVBU RUČNĚ ŘÍZENÝCH STROJŮ NA CNC

Při přestavbě stroje není potřeba tolik komponent jako při konstrukci nového CNC stroje. Je také jasné, že přestavba je na rozdíl od konstrukce nového CNC stroje omezena stávající konstrukcí stroje. Na druhou stranu je k dispozici již funkční základ (např. stojan, lože, vedení apod.), který není potřeba konstruovat. Disponují vším, co je pro provoz v ručně řízeném režimu potřeba. Pro provoz v režimu CNC však mnohé komponenty nejsou vhodné a některé ve strojích nejsou vůbec. Je třeba mít na paměti, že mnoho prvků se skládá z velkého počtu dalších prvků atd.



Obr. 7 Zjednodušené schéma CNC řízení (šedě vyznačené prvky nemusí CNC stroj vždy obsahovat)

Asi největší rozdíl mezi ručním a CNC řízením je použití počítače. Díky využití počítače lze stroj jednak lépe monitorovat (hladinový snímač oleje, koncové spínače na osách apod.) ale především strojně řídit. K tomu jsou potřeba jednak jednotlivé pohony (vřetene, os, čerpadel atd.) a dále také ovladače těchto pohonů. Pro jednodušší řízení při dané přesnosti je snaha používat bezvůlové posuvové mechanismy, vložené převody, popř. je vhodné tyto vůle zjistit (pomocí zpětných vazeb) a kompenzovat, pomocí regulátorů pohonů. CNC řízení dovoluje jiný charakter obrábění. Což zahrnuje i jiné požadavky na jednotlivé prvky, jako jsou vedení, vřeteno a další. Mnohé stávající prvky ručně řízených strojů lze i využít pro tento způsob řízení, často se tak ale sníží jejich životnost. Vzhledem ke komplexnosti CNC strojů a k charakteru této práce jsou dále popsány pouze vybrané součásti.

3.1 Vřeteno

Původní vřetena často svými parametry (zejména malým rozsahem otáček) nevyhovují požadavkům pro CNC stroj. Dalším problémem je řízení otáček. Ručně řízené stroje disponují motorem zapojeným na třífázovou síť většinou bez regulace otáček. Toto řízení je pro CNC stroje nevhodné, neklesá sice krouticí moment s otáčkami (díky převodovému poměru právě naopak) ale otáčky nelze řídit spojitě a jsou omezené pouze převodovými poměry převodových stupňů, navíc je nutné je řadit ručně.

Jedním řešením situace je nahrazení stávajícího motoru a převodovky motorem řízeným frekvenčním měničem. Motor je spojen převodem se stávajícím vřetenem.

V případě nevhodnosti celého vřetena je nutné jej nahradit. Je více způsobů jak to provést. Jeden ze způsobů obsahuje návrh a konstrukci nového vřetena i s vřeteníkem. V dalším lze použít již kompletní vřeteno s vnějším pohonem. Třetím způsobem je pak použití vřeten s vnitřním pohonem, nejčastěji elektrovřeten. Vřetena se také mohou dělit podle mnoha jiných kritérií, kterými jsou např. způsob upínání, upínací kužel, rozsah otáček atd. Dále je uvedena velmi krátká rešerše, více informací lze získat z lieratury [6, 7, 8].

3.1.1 Vřeteno s vnějším pohonem

Jak už název napovídá, tento typ vřetena neobsahuje integrovaný pohon. Přenos krouticího momentu z hřídele pohonu na hřídel vřetena je realizován prostřednictvím vloženého převodu, či bezvůlové spojky. Vřetena s vnějším pohonem se vyskytují ve většině ručně řízených strojů (vložený převod je zde ve formě převodovky) ale i v CNC strojích. Při přestavbě lze využít jak vlastního návrhu vřetene, tak nabídek firem, které nabízejí kompletní vřetena ať už s pohonem nebo bez něj. Při použití kompletního nabízeného vřetena odpadají problémy s vlastním návrhem, avšak vřeteno nemusí dokonale zapadat do celku stroje.

3.1.1.1 Převod

V ručně řízených strojích je nejčastěji použit převod ozubenými koly, či asynchronním řemenem, resp. jejich kombinací. V CNC strojích jsou používány zejména dva druhy převodu a to převod ozubenými koly a převod synchronním řemenem. Pohon spojený tímto převodem je připevněn ke konstrukci vřeteníku. Je-li vřeteno na pohyblivé ose, znamená to vyšší hmotnost pohyblivých částí stroje, což způsobuje vyšší opotřebení vedení a vyšší nároky na pohon osy a dalších komponent. Postačuje-li rozsah otáček pohonu požadovaným otáčkám vřetene, lze použít spojení pomocí bezvůlové spojky. Spojka se používá pro tlumení vibrací a vyrovnání případných nesouosostí mezi hřídelí pohonu a hřídelí vřetena.

3.1.1.2 Pohon

O pohon vřetena většiny ručně řízených strojů se stará střídavý asynchronní motor zapojený do sítě nejčastěji bez regulace. Otáčky motoru jsou tedy neměnné. Nastavení otáček vřetena je umožněno pomocí převodovky. Převodovka však znamená také omezení, a to v podobě pevných převodových poměrů, jež neumožňují nastavit libovolné otáčky a také znamená další hmotu s níž je potřeba pohybovat.

Pro pohon CNC vřeten je použit nejčastěji střídavý asynchronní motor řízený frekvenčním měničem či servomotor řízený servo driverem, ve většině případů se zpětnou vazbou. Nevýhodou těchto řízení je proměnlivý výkonu v závislosti na otáčkách. Výhodou je zejména možnost plynulé změny otáček a možnost řízení pomocí počítače.

Obr. 8 Vřeteno firmy MicroLAB [9] určené pro použití s externím pohonem [10]

3.1.2 Vřeteno s vnitřním pohonem

Hřídel tohoto vřetena je zároveň rotorem pohonu vřetena. Vřeteno s integrovaným pohonem vyžaduje celkový menší zástavbový prostor. Odpadá nutnost použití převodu a spojek a tím i snížení rotujících hmot při provozu vřetene. Pohybující se hmoty jsou zdrojem odporů a také vibrací. Eliminací těchto hmot je způsobena vyšší účinnost celého mechanismu, nižší vibrace a lepší dynamické vlastnosti vřetena. Tyto vlastnosti umožňují dosáhnout vyšší přesnosti obrábění a lepší jakosti povrchu a v neposlední řadě umožňují pružnou změnu otáček. U vřeten s vnitřním pohonem je důležité chlazení. Vřeteno bývá nejčastěji chlazeno vzduchem nebo kapalinou (vodou, olejem). Nevýhodou vřeten s integrovaným pohonem je jejich vysoká cena, která je mnohonásobně vyšší než cena vřeten s vnějším pohonem.

Obr. 9 Elektrovřeteno firmy MicroLAB [9] vybaveno vlastním pohonem [11]

3.2 Posuvové soustavy

Pohybové soustavy zajišťují vzájemný pohyb obrobku vůči nástroji. Pohybovat se může podle typu buď stůl, obrobek nebo obojí.

Základní prvky pohybové soustavy jsou: lože, vedení, posuvový mechanismus, pohon a vložený převod (nemusí být). Posuvové mechanismy jsou blíže popsány v následujících kapitolách.

3.2.1 Posuvová soustava s posuvovým šroubem

3.2.1.1 Posuvová soustava s trapézovým šroubem

Trapézový šroub patří do kluzných mechanismů a právě tření je jeho velkou nevýhodou. Tření způsobuje nízkou účinnost převodu a opotřebování, což má za následek vůle. U ručně řízených strojů kompenzuje tyto vůle obsluha, u CNC strojů lze tyto vůle taktéž kompenzovat a to softwarově, s využitím zpětné vazby. Tyto šrouby se vyrábí nejčastěji jemným soustružením či broušením. Matice jsou buď také obráběné (nejčastěji soustružené či broušené) nebo odlévané. Pro výrobu **pohybových matic** se volí materiály jako: **bronzi** (např.: **CuSn12-C** (dle EN 1982)) [13], **litiny** (např.: **42 2425** (dle ČSN 42 0006)) [15], **oceli** (např.: **11 S Mn 30** (dle ČSN EN 10087)) [14], **spékané materiály**, či **plasty** (např.: **PA 6 + Mo S2** (dle DIN 7728)) [12]. **Trapézové šrouby** jsou nejčastěji **ocelové** (např.: **14 260** (dle ČSN EN 10020)) [15] a mohou být vyrobeny obráběním, či tvářením. Pro minimalizaci vůle se používá dělená matice.

3.2.1.2 Posuvová soustava s kuličkovým šroubem

Jak je psáno již výše, vůle u pohybových mechanismů jsou nežádoucí. Proto je snaha je minimalizovat a také ustálit (což u třecích mechanismů není jednoduché). Z tohoto důvodu se u CNC aplikací používají převážně šrouby kuličkové. Tyto šrouby na rozdíl oproti trapézovým patří do skupiny valivých mechanismů. Princip funkce kuličkového šroubu je obdobný funkci ložiska. Kuličky zde však neobíhají v kruhové dráze ale po šroubovici šroubu a na konci matice se vracejí vratným kanálkem zpět na začátek. Výhodou je vysoká účinnost a přesnost převodu. Nevýhodou je omezené použití pro dlouhé zdvihy z důvodu kmitání šroubu při otáčení, popř. nebezpečí vzpěru. Každý šroub má také své kritické otáčky, při nichž je rozkmit největší, jehož hodnota, popř. její výpočet je uveden technické dokumentaci výrobce. Převod pomocí kuličkového šroubu a matice existuje ve variantě jak s poháněným šroubem, tak s poháněnou maticí. K dostání jsou tři základní druhy kuličkových šroubů.

Kuličkový šroub válcovaný

Šrouby vyráběné metodou tváření (válcování) profilu závitu disponují nejnižší cenou a zhutněným (pevnějším) povrchem z těchto tří uvedených metod, avšak také nejnižší přesností. Běžná vyráběná přesnost těchto šroubů je IT7 výběrem lze nalézt i šrouby s přesností IT5 (DIN ISO 3408) [16]. Svými parametry nejsou příliš vhodné na přesné CNC obráběcí stroje. Uplatnění naleznou spíše v hobby sféře či manipulačních zařízeních.

Kuličkový šroub okružovaný

Tato metoda zahrnuje obrábění (okružování) profilu závitu do povrchově kaleného polotovaru. Což je důvodem méně hlubokého profilu závitu a použití menších kuliček. To způsobuje nižší únosnost šroubu. Běžně vyráběná přesnost okružovaných šroubů je IT7 až IT5 (DIN ISO 3408) [16].

Kuličkový šroub broušený

U těchto šroubů se provádí broušení předobrobeného kaleného polotovaru. Šrouby vyráběné touto metodou mají nejvyšší přesnost z těchto tří uvedených, zároveň ale nejvyšší cenu. Standardně vyráběná přesnost těchto šroubů je IT3 až IT1 (DIN ISO 3408) [16]. Svými parametry jsou vhodné pro přesné obráběcí stroje a měřicí zařízení. Vysoká cena znamená, že válcovaný kuličkový šroub v přesnosti IT5 je až 10x levnější než broušený kuličkový šroub v přesnosti IT3.V Tab. 1 jsou uvedeny odchylky jednotlivých tříd přesnosti.

Tab. 1 Odchylky tříd přesnosti dle DIN ISO 3408 [17]

Stupeň přesnosti	Odchylka na otáčku	Odchylka na 300 mm
IT0	3 μm	3,5 μm
IT1	4 μm	5 μm
IT2	5 μm	7 μm

Stupeň přesnosti	Odchylka na otáčku	Odchylka na 300 mm
IT3	6 μm	8 μm
IT5	8 μm	18 μm

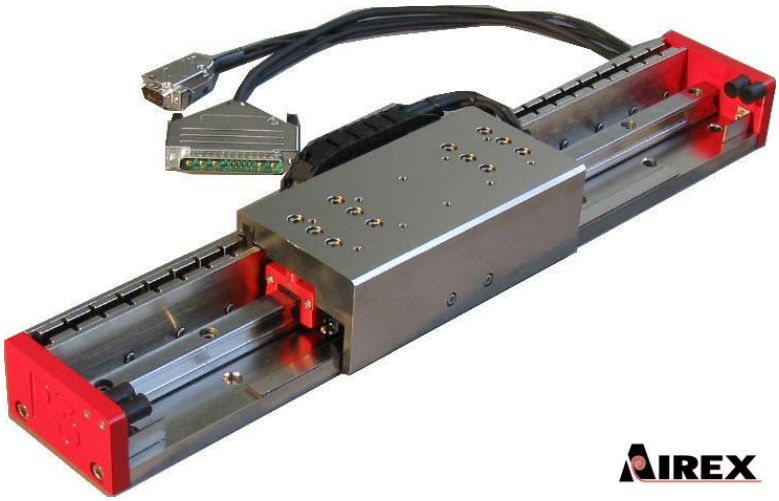
3.2.2 Posuvová soustava s pastorkem a ozubeným hřebenem

Tento převod se používá i u ručně řízených strojů, kde má tento převod většinou vůli. V případě těchto strojů to nevadí, obsluha by s ní měla umět pracovat. U CNC aplikací je jednou z možností minimalizace vůle v převodu dělený pastorek. Tuto soustavu lze použít i u stejných aplikací jako soustavu s pohybovým šroubem. S výhodou ji lze však využít i pro dlouhé zdvihy, pro které je standartní kuličkový šroub nevhodný (např. zde [18]). Ozubený hřeben může být jak ve verzi s rovnými, tak s šikmými zuby (viz Obr. 10).

Obr. 10 Ozubený hřeben s pastorkem [19, 20].

3.2.3 Další možnosti posuvových soustav

Tyto možnosti existují, ale jejich použití není v tak velkém měřítku jako u soustav předchozích. Důvodem bývá často vysoká cena, složitost, či specifické vlastnosti soustavy. Do této skupiny spadají posuvové soustavy např.: s hydrostatickým šnekem, lineárním motorem, pneumotorem apod.



Obr. 11 Jedno z mnoha řešení s lineárním motorem od firmy Airex [21].

3.3 Převody CNC strojů

Tyto převody lze nalézt všude tam, kde je potřeba přenést krouticí moment z pohonu na další části stroje jakými jsou např. hřídele a pohybové šrouby.

3.3.1 Ozubený převod

Tento převod využíván snad ve všech ručně řízených strojích. Může být v mnoha variantách, např.: ozubená kola s čelním ozubením, kuželová ozubená kola, šnekový mechanismus, atd. Pro převod čelními ozubenými koly je vhodné použít šikmé či tvarové zuby, což sníží rázy a tím i vibrace v převodu. Ozubená kola jsou vyráběna z celé řady materiálů, jako jsou: ocel, litina, plasty, barevné kovy apod.

Výhody:

- možnost přenášet velké krouticí momenty,
- synchronizace,
- možnost dosáhnout velkého převodového poměru vzhledem celkovým rozměrům mechanismu.

Nevýhody:

- rázy v převodu => vibrace (lze zmírnit vhodnou volbou parametrů ozubení) relativně malá účinnost,
- v ideálním případě by mělo nastat pouze odvalování, reálně se v převodu vyskytuje tření => snížení účinnosti, složitější udržitelnost bezvůlovosti,
- složitý přenos krouticího momentu na dlouhou vzdálenost (potřeba použití vložených ozubených kol).

Nejčastější výskyt u CNC strojů:

- ozubené hřebeny,
- ozubené převody u některých vřeten,
- převodovky (např. planetová) u prvků, např. převodovka mezi elektromotorem a čerpadlem procesní kapaliny.

3.3.2 Řemenový převod

Tento převod je taktéž využíván u ručně řízených strojů. Zejména však jeho první popisovaná varianta, asynchronní řemenový převod. Řemenový převod se skládá z řemenic, řemenu a popř. napínací kladky.

Obecné výhody převodu:

- pružnost řemenu => tlumí rázy, vibrace,
- umožňuje přenos krouticího momentu na dlouhou vzdálenost.

Obecná omezení převodu:

- složitější dosáhnutí velkých převodových poměrů (oproti ozubenému převodu),
- pružnost řemenu => neblahý vliv na přesnost,
- menši přenášené krouticí (oproti ozubenému převodu),
- náchylné na teplotu (vysoká teplota pro řemenový převod je již např. 130°C [41]),
- omezené maximální otáčky (kvůli odstředivé síle působící na řemen).

3.3.2.1 Asynchronní řemenový převod

Přenos krouticího momentu je zajištěn pouze třením mezi řemenicí a řemenem. Může tak docházet k prokluzu a otáčky hnané a hnací řemenice nelze zajistit synchronní. Tento převod může být v provedení s klínovým, plochým či drážkovým řemenem. Výchozí materiál pro tyto řemeny je přírodní či směs syntetických kaučuků [41]. Řemenice mohou být odlévané, obráběné či tvářené. Nejčastější materiály řemenic jsou: oceli a slitiny hliníku.

Výhody:

- při kolizi nastane prokluz (způsob ochrany před např. zlomení dílů),
- jednoduchá výroba řemenic.

Nevýhody:

- možnost prokluzu převodu => nelze zaručeně synchronizovat otáčky řemenic.

Místo využití:

- u ručně řízených strojů pro pohon vřetene.

3.3.2.2 Synchronní řemenový převod

Přenos krouticího momentu je zajištěn třením mezi řemenicí a řemenem a také tvarovým stykem zubů řemene s řemenicí. Díky tomuto nedochází k prokluzu řemene a otáčky obou řemenic jsou synchronní. Existuje mnoho tvarů jak profilu zubu, tak křivky zubu.

Výhody:

- synchronizace otáček řemenic,
- bezvůlovost.

Nevýhody:

- složitější pro výrobu.

Místo využití u CNC strojů:

- pohon vřetena,
- pohon pohybových šroubů.

3.3.3 Přímý převod

Přímým převodem se rozumí spojení hřídele motoru a hřídele např. pohybového šroubu bez použití vloženého převodu. Převodový poměr je tedy vždy 1. Tento převod se volí v případě, dostačují-li parametry pohonu (otáčky, krouticí moment). Pro tento převod se využívají různé spojky (např. pružné spojky s čelními zuby a pružným elementem, pružná lamelová spojka apod.). Při nesouososti hřídele motoru a např. pohybového šroubu vznikají v uložení nadbytečné radiální síly. Jedním z požadavků kladených na tyto spojky je tyto síly odstranit, či alespoň snížit. Dalším požadavkem je tlumení rázů a vibrací.

Obr. 12 Pružná lamelová spojka se svěrným pouzdrem [22]

3.4 CNC systémy

3.4.1 CNC systémy zavedených výrobců

Mezi zavedené výrobce CNC systémů patří např.:

- Fanuc [23], zaměření výrobce: automatizace, robotické ruky,
- Siemens (Sinumerik) [24], zaměření výrobce: elektrotechnika,
- Heidenhain [25], zaměření výrobce: měřicí a řídicí technika,
- Mitshubishi [26], zaměření výrobce: elektrotechnika,
- Fagor [27], zaměření výrobce: elektrotechnika,
- Atd.

CNC systémy od výše zmíněných výrobců lze sehnat jako jeden funkční celek, výhodou je odladěnost a stabilita systému. Při případných problémech nabízí výrobci také perfektní servis. Nevýhodou je cena. Lze však také sehnat starší systémy, ze strojů u kterých byla provedena modernizace. Cena starších systémů je o mnoho nižší. Další možná nevýhoda plyne z odladěnosti systému, kvůli které nemůže být v libovolné míře modulovatelný. Systémy jsou dodávány pro konkrétní aplikaci, systém lze sice v rámci této aplikace upravovat ale jen do té míry, kterou nastavil výrobce (CNC systém např. pro max. 4 řízené osy, popř. může být pro 5 řízených os, z toho pouze pro 3 současně apod.). Systémy těchto výrobců je tedy vhodné použít v případě jasně dané aplikace, která se nebude zásadně upravovat.

3.4.2 CNC systémy dalších výrobců

Jedná se o méně známé, menší výrobce, jejichž systémy nejsou již několik desetiletí zavedeny. Často se zaměřením pouze na tyto CNC systémy. Výhodou je nižší cena oproti zavedeným výrobcům. Nevýhodou je nezaručená kvalita. Lze nalézt CNC systémy velmi dobře funkční i s výborným servisem, naopak lze také nalézt systémy, které svou funkčností nepřesvědčí. Mezi výrobce takových CNC systémů patří:

- GSK [28],
- Gravos [29],
- Centroidcnc [30],
- Atd.

3.4.3 CNC řídicí software

Jedná se o nejlevnější variantu CNC systému. CNC řídicí software je nainstalován do PC. Do PC jsou napojeny další prvky, jako jsou: drivery jednotlivých motorů, frekvenční měnič, popř. řídicí desky atd. Připojeny jsou pomocí různých rozhraní (nejzákladnější je paralelní port). Velkou nevýhodou, která může být i výhodou je nesložený systém. Lze tak poskládat systém přesně podle potřebné aplikace. Dále je možné také tento systém různě upravovat a rozšiřovat. To sebou nese velké požadavky na znalosti této problematiky. Ve výsledku totiž funkčnost úzce závisí na schopnosti zvolit správné kombinace prvků a také tyto prvky vhodně nastavit. Mezi CNC řídicí software patří:

- LinuxCNC [31], funguje pod OS Linux,
- Mach3 [32], funguje pod OS Windows.

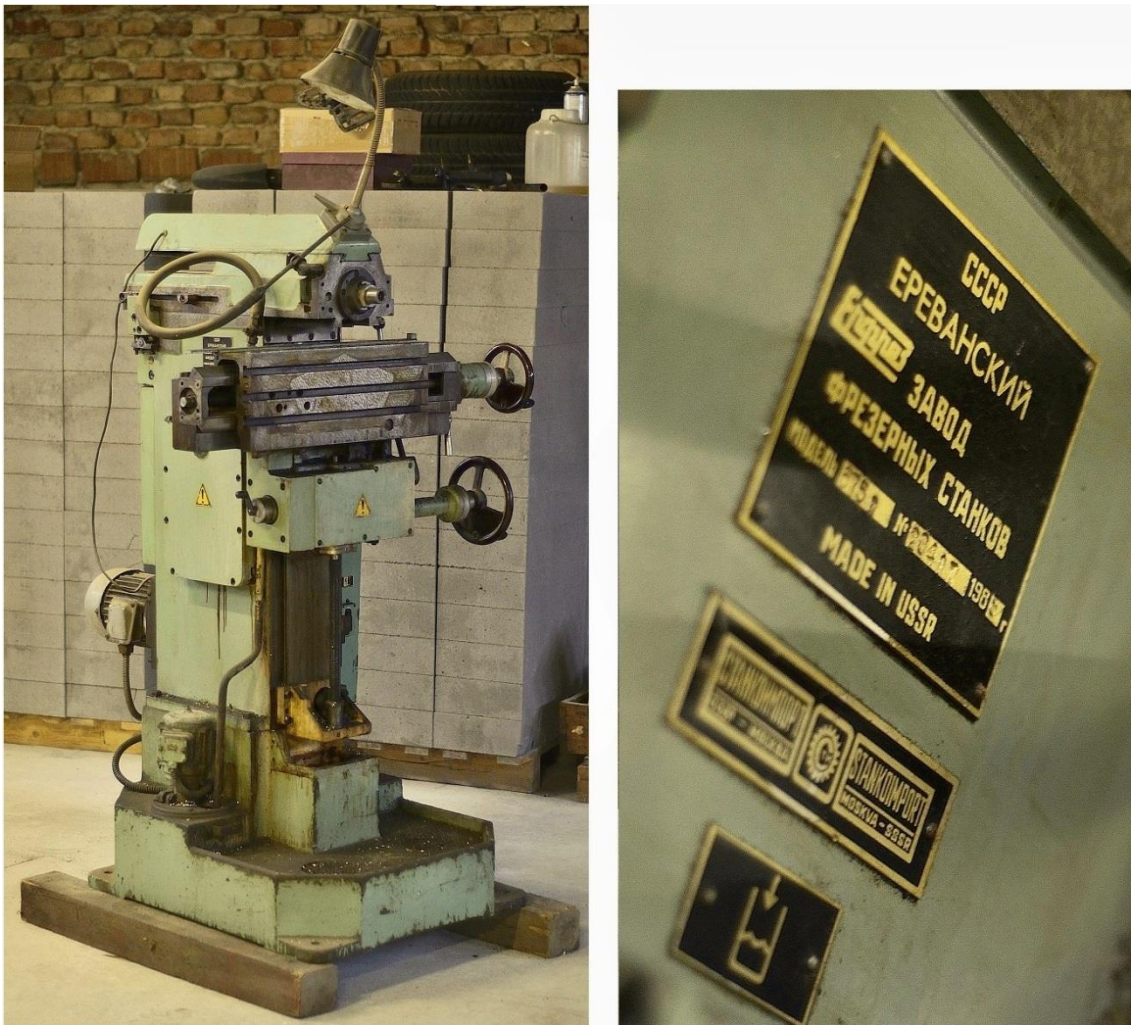
4 PŘESTAVBA RUČNĚ ŘÍZENÉ FRÉZKY NA CNC

Představení stroje použitého k přestavbě

Rozhodnutí této přestavby předcházelo mnoho úvah. V nichž některé úvahy obsahovaly stavbu malé CNC frézky či soustruhu. Později se ale objevila nabídka od mého otce přestavět nevyužívanou nástrojařskou frézku, jež je v dobrém technickém stavu. Tato možnost mi připadala reálná. Frézka není příliš rozměrná ani hmotná pro mé možnosti úprav. Navíc se skládá z mnoha bloků, které jsou vzájemně rozebíratelně spojeny, což zjednodušuje úpravu jednotlivých bloků (dílů). Hotová frézka také zaručuje jistou dávku přesnosti a tuhosti. V následující Tab. 2 jsou uvedeny parametry použitého stroje.

Tab. 2 Parametry použitého stroje pro přestavbu.

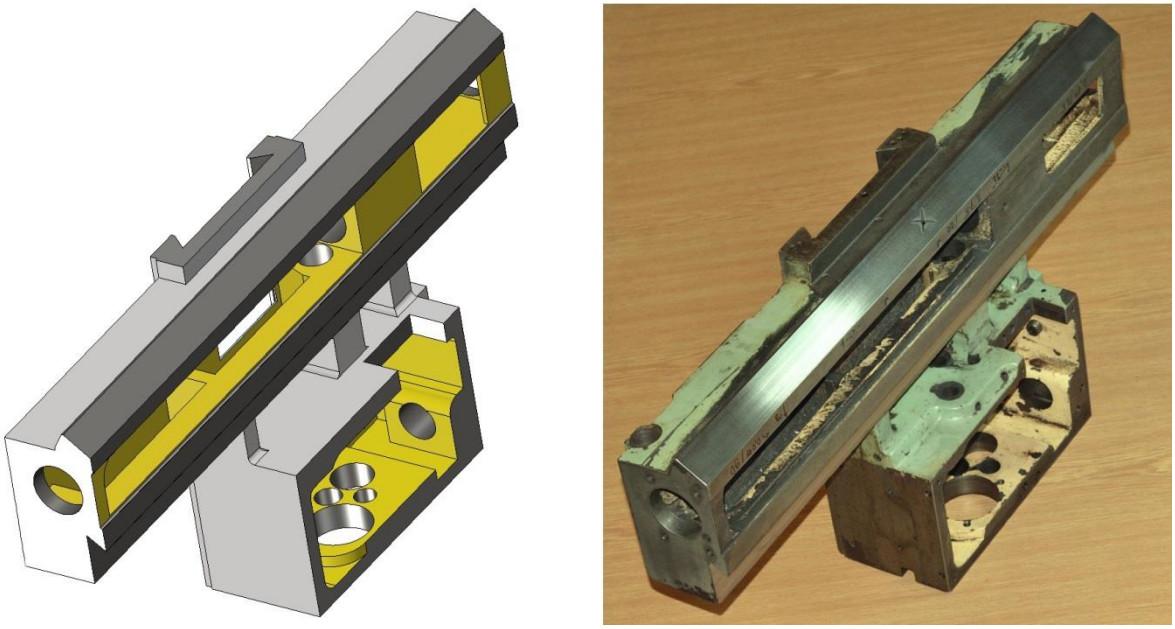
Výrobce	ЕРЕВАНСКИЙ ЗАВОД ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ (Jerevanský závod frézovacích strojů)	
Označení frézky	675П (675P)	
Celkové rozměry (D x Š x H)	1110x1170x1650 mm	
Pracovní plocha stolu	Vertikální stůl	200x630 mm
	Horizontální stůl	200x500 mm
Pracovní rozjezdy	X	320 mm
	Y	200 mm
	Z	300 mm
Otáčky vřetene	50-1600 min^{-1}	
Upínací kužel vřetene	Morse 4	
Výkon motoru vřetene	1,5 kW	
Otáčky motoru vřetene	1440 min^{-1}	



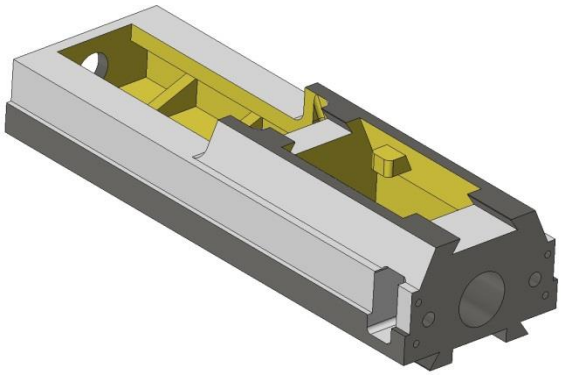
Obr. 13 Upravovaná frézka v původním stavu

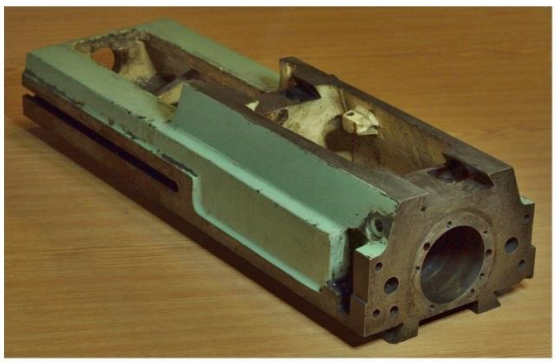
4.1 Demontáž dílů, tvorba modelů

V první části přestavby následovalo postupné rozebrání celého stroje a vytvoření modelů potřebných stávajících dílů. Mnoho stávajících dílů, jako jsou trapézové pohybové šrouby, převodovky, motor vřetena ani vřeteno a mnoho dalších nebude při přestavbě použito. Převodovky nahradí měniče kmitočtu, trapézové šrouby budou nahrazeny šrouby kuličkovými a horizontální vřeteno bude nahrazeno vřetenem vertikálním. Pro vytvoření modelů bylo potřeba díly změřit. Měření většiny rozměrů neprobíhalo ve vyšší přesnosti, často pouze metrem, protože tyto rozměry nebyly pro prvotní tvorbu modelu důležité. Měření funkčních rozměrů probíhalo pomocí posuvného měřítka. Nejvyšší pozornost byla věnována roztečím a průměrům funkčních děr. Poloha těchto prvků vůči vnějším tvarům není tak důležitá jako poloha, např. otvorů vůči sobě. Může se proto stát, že některé rozměry na modelu po srovnání se skutečným dílem mohou být odlišné v řádu i několika milimetrů. Tyto rozdíly budou později upravovány. Model byly vytvořeny pro představu možného umístění potřebných komponent, jako jsou držáky servomotorů apod. Výslednou přesnost zaručí spasování nových dílů se stávajícími. Tento postup byl zvolen z důvodu menší časové i finanční náročnosti, oproti přesnému měření všech rozměrů na všech dílech. Na Obr. 14, Obr. 15 je porovnání skutečných dílů a modelů konzoly a příčníku. Tvorba modelů a výkresové dokumentace probíhala v prostředí programů firmy ZWSoft (ZW3D a ZWCAD) [33].



Obr. 14 Konzola





Obr. 15 Příčník

4.2 Stanovení požadovaných parametrů stroje

- Rozsah otáček vřetene: n_2 = 150 - 8000 ot.min^{-1},
- vertikální vřeteno s výměnnými upínači,
- rychloposuv: 5000 mm.min^{-1},
- tento stroj bude využit pro dokončovací operace a obrábění méně rozměrných dílů.

4.3 Realizace vybraných úprav na stroji

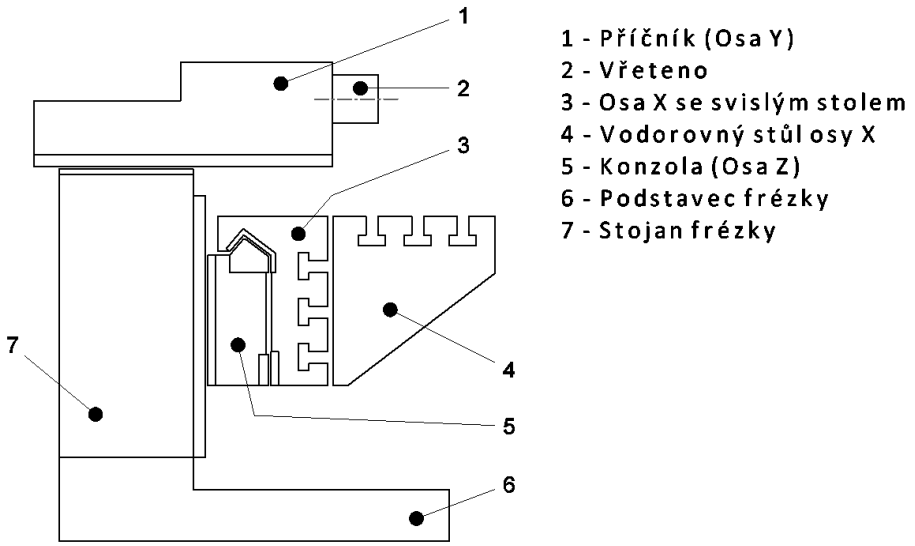
4.3.1 Návrh vřetena

S ohledem na CNC režim

Stroj ve své stávající podobě již vřetenem samozřejmě disponoval. Vřeteno bylo horizontální, s upínacím kuželem ISO 40. O pohon vřetena se staral AC elektromotor připevněný ke stojanu frézky. Stroj obsahoval také převodovky, jak pro posuvy, tak pro vřeteno. Přenos krouticího momentu z převodovky v pevném stojanu na hřídel vřetena (jež je umístěno v pohyblivé ose) byl realizován pomocí dlouhého pastorku na hřídeli ve stojanu a pohyblivého ozubeného kola na hřídeli vřetena. Toto řešení je vhodné pro ručně řízený stroj, pro CNC stroj, však nikoliv. Z důvodu zejména tření mezi ozubenými koly při posouvání osy. Režim CNC zahrnuje více pohybů než režim ruční a to by mohlo způsobit brzké opotřebení. Dalším negativem tohoto řešení je vůle v převodech, která by komplikovala synchronizaci otáček vřetena a posuvů, např. při řezání závitů.

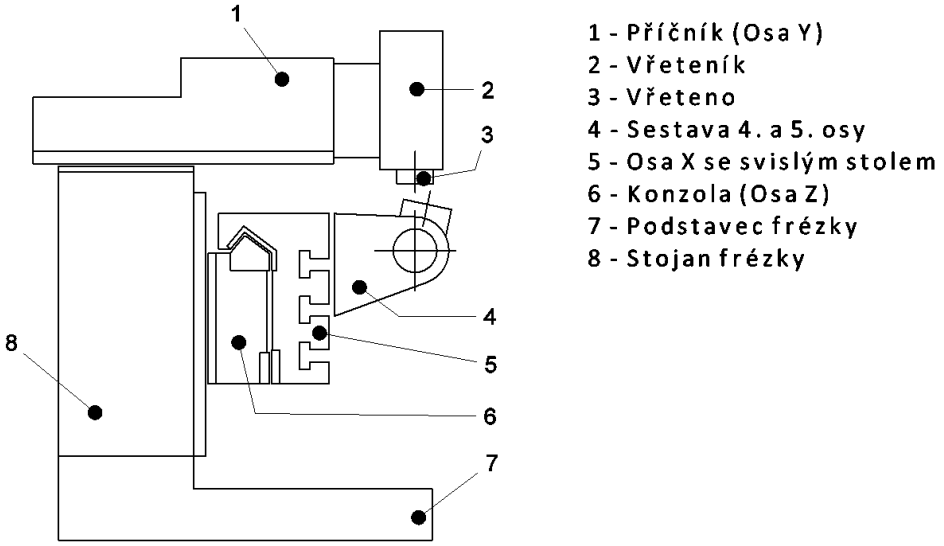
S ohledem na konstrukci stolu stroje

Stroj ve stávajícím stavu disponuje dvěmi možnostmi stolu. První možnost je použití stolu vodorovného. V tomto stavu byl stroj využíván pro výrobu před přestavbou.



Obr. 16 Schéma použité frézky i s vodorovným stolem

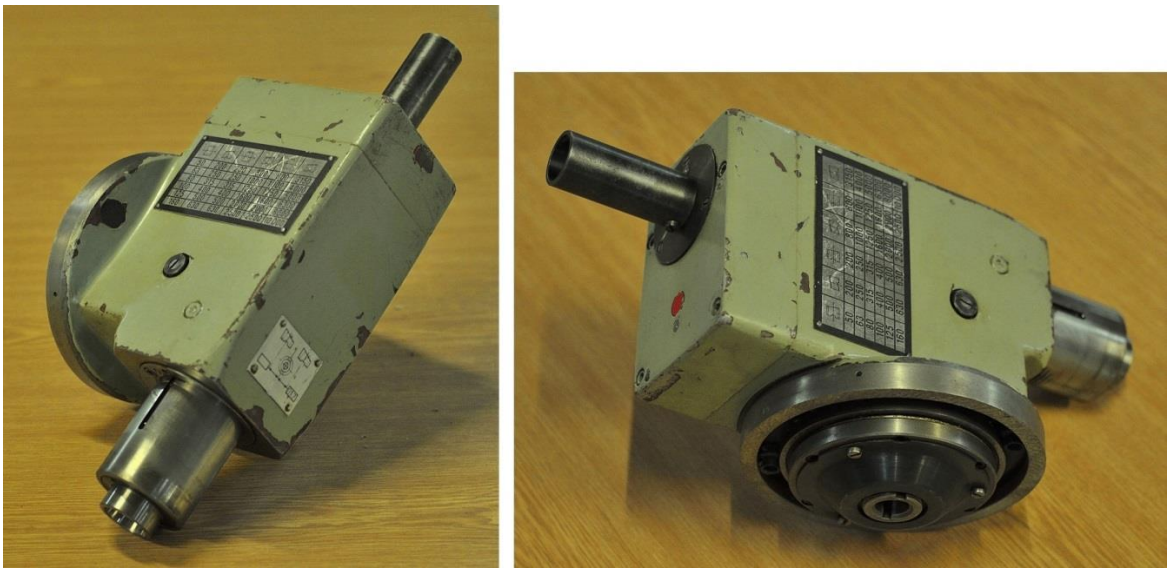
Druhá možnost je demontovat stůl vodorovný a nechat stůl pouze svislý (viz Obr. 13 a Obr. 17). Tato varianta by mohla být v budoucnu využita pro upínání řízené děličky, popř. sestavy 4. a 5. osy. Horizontální vřeteno by však pro toto řešení bylo nevhodné. Proto bylo pro přestavbu zvoleno vřeteno vertikální.



Obr. 17 Schéma použité frézky pouze se svislým stolem a případnou 4. a 5. Osou

4.3.1.1 Výběr vřetene

Pro přestavbu byla zvolena vertikální frézovací hlava s neznámým označením. Podle podobností se však možná jedná o vřeteno stroje TOS FN 20, či je přinejmenším typově shodné. Vřeteno je ve stávajícím stavu převodováno do rychla, s převodem i = 1/4. Tento převod je realizován kombinací ozubeného a řemenového převodu. Vřeteno disponuje také výsuvnou pinolou. Pro upínání nástrojových upínačů je zde využit kužel ISO 30 dle ČSN ISO 297 [34]. Upínače jsou ve vřeteni zajištěny vtahovacím šroubem. Výměna těchto upínačů probíhala ručně (povolením šroubu a vyklepnutím).



Obr. 18 Vřeteno použité při přestavbě

O pohon vřetena se bude starat AC servomotor. Tento pohon byl zvolen z důvodu velmi dobrého poměru výkonu a rozměrů (hmotnosti) a také dobrému rozsahu otáček. Stávající ozubený i řemenový převod bude demontován, a bude nahrazen jediným řemenovým převodem. Servomotor bude řízen frekvenčním měničem. Tato volba byla provedena z důvodů nižší finanční náročnosti než u servomotoru se servodriverem.

4.3.1.2 Kontrola pohonu vřetene

Tento stroj svou konstrukcí nespadá do strojů určených k hrubovacím operacím, po nichž je vyžadována schopnost obrábění velkými nástroji s velkými úběry. Tento stroj bude využíván pro výrobu malých dílů, popř. dle dosažené přesnosti pro dokončování. Pohon vřetena byl navržen podle dvou základních operací, které bude stroj vykonávat.

Popis operace:

Drážkové frézování frézou: SECO R217.69 - 1020.RE-09.3A s vyměnitelnými břitovými destičkami: XOEX090304FR-E05 [35]. Při frézování budou použity parametry a řezné podmínky dle následující tabulky Tab. 3.1.

Označení obráběného materiálu dle ČSN 42 0002: 19 520 (ekvivalent dle ČSN EN 10 027-2: 1.2312), do plna, tzn. a_e = 20 mm a šířka záběru hlavního ostří nástroje a_p = 1 mm. Výpočty operace frézování a vrtání byly provedeny s podporou literatury [37].

Tab. 3 Stanovené parametry pro drážkové frézování [35, 43]

Název	**Hodnota**
Průměr frézy	D = 20 mm
Počet zubů frézy	z = 3
Nástrojový úhel nastavení ostří	$\kappa_r = 90°$
Úhel čela	$\gamma_0 = 10°$
Šířka záběru hlavního ostří nástroje	a_p = 1 mm
Šířka frézování	a_e = 20 mm
Řezná rychlost	$v_c = 325\ m \cdot min^{-1}$
Posuvová rychlost	$v_f = 600\ mm \cdot min^{-1}$
Obráběný materiál	1.2312
Jednotková řezná síla pro frézování	$k_{c1} = 1700\ N \cdot mm^{-2}$
Koeficient nárůstu síly	$m_c = 0{,}24$
Účinnost řemenového převodu	$\eta_ř = 99\%$
Účinnost ložiska	$\eta_L = 99\%$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_c}{\pi D} = \frac{325}{\pi \cdot 0{,}02} = 5173\ min^{-1} \tag{1}$$

Posuv na zub:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} = \frac{600}{5173 \cdot 3} = 0{,}039\ mm \tag{2}$$

Průměrná tloušťka třísky:

$$h_m = \frac{180 \cdot \sin(\kappa_r) \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arcsin(\frac{a_e}{D})} = \frac{180 \cdot \sin(90) \cdot 20 \cdot 0{,}039}{\pi \cdot 20 \cdot \arcsin(\frac{20}{20})} = 0{,}025\ mm \tag{3}$$

Specifická řezná síla:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) = \frac{1700}{0{,}025^{0{,}24}} \cdot \left(1 - \frac{10}{100}\right) = 4136\ N \cdot mm^{-2} \tag{4}$$

Celková účinnost:

$$\eta_c = (\eta_ř \cdot \eta_L \cdot \eta_L) \cdot 100 = (0{,}99 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}99) \cdot 100 = 97\% \tag{5}$$

Potřebný výkon motoru:

$$P_c = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f \cdot k_c}{\eta_c} = \frac{20 \cdot 1 \cdot \frac{600}{60} \cdot 4136}{0{,}97} = 0{,}85\ kW \tag{6}$$

Krouticí moment na nástroji:

$$M_c = \frac{P_c \cdot 30}{\pi \cdot n} = \frac{850 \cdot 30}{\pi \cdot 5173} = 1{,}57\ Nm \tag{7}$$

Řezná síla:

$$F_{cf} = \frac{M_c}{\frac{D}{2}} = \frac{1{,}57}{\frac{0{,}020}{2}} = 157\ N \tag{8}$$

Jako druhou operaci pro návrh vřetene volím operaci vrtání. Požadované výstupní hodnoty tohoto výpočtu jsou: osová síla pro vrtání, výkon a krouticí moment motoru. Pomocí těchto hodnot bude možno navrhnout pohony.

Popis operace:

Vrtání slepé díry do hloubky l_m = 15 mm. Monolitním karbidovým vrtákem firmy SANDVIK COROMANT CoroDrill 860.1-0600-019A0-PM [36]. Obráběný materiál: dle ČSN 42 0002: 19 520 (ekvivalent dle ČSN EN 10 027-2: 1.2312), za použití procesní kapaliny přiváděné zvnějšku. Operace je prováděna se stanovenými parametry a řeznými podmínkami v Tab. 4. Pro výpočet byly použity vzorce výrobce vrtáku [38]

Pozn.: Vrtákem lze vrtat posuvem na otáčku až f_n = 0,224 mm. Vzhledem k typu stroje, na kterém nebudou dosahovány nominální řezné podmínky nástrojů, volím posuv na otáčku f_n = 0,1 mm.

Tab. 4 Stanovené parametry pro vrtání slepé díry [36]

Název	Hodnota
Průměr vrtáku	D_c = 6 mm
Počet zubů vrtáku	z = 2
Nástrojový úhel nastavení ostří	κ_r = 70°
Úhel čela	γ_0 = 30°
Hloubka vrtání	l_m = 10 mm
Řezná rychlost	v_c = 100 $m \cdot min^{-1}$
Posuv na otáčku	f_n = 0,01 mm
Obráběný materiál	1.2312
Jednotková řezná síla pro vrtání	k_{c1} = 2300 $N \cdot mm^{-2}$
Koeficient nárůstu síly	m_c = 0,24
Celková účinnost	η_c = 97%

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_c}{\pi D} = \frac{100 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 5305\ min^{-1} \tag{9}$$

Posuv na zub:

$$f_z = \frac{f_n}{z} = \frac{0{,}1}{2} = 0{,}05\ mm \tag{10}$$

Specifická řezná síla:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{(f_z \cdot \sin(\kappa_r))^{m_c}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) \tag{11}$$

$$k_c = \frac{2300}{(0{,}05 \cdot \sin(70))^{0{,}24}} \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 3354\ N \cdot mm^{-2}$$

Potřebný výkon motoru:

$$P_c = \frac{f_n \cdot v_c \cdot D_c \cdot k_c}{240 \cdot 10^3 \cdot \eta_c} = \frac{0{,}1 \cdot 100 \cdot 6 \cdot 3354}{240 \cdot 10^3 \cdot 0{,}97} = 0{,}86\ kW \tag{12}$$

Krouticí moment na nástroji:

$$M_c = \frac{P_c \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot n} = \frac{0{,}86 \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot 5305} = 1{,}56\ Nm \tag{13}$$

Síla posuvu:

$$F_f \approx 0{,}5 \cdot k_c \cdot \frac{D_c}{2} \cdot f_n \cdot \sin(\kappa_r) = 0{,}5 \cdot 3354 \cdot \frac{6}{2} \cdot 0{,}1 \cdot \sin(70) = 473\ N \tag{14}$$

Výše uvedené výsledky potřebného výkonu motoru vřetena **platí** za předpokladu, že by měl řemenový převod **převodový poměr i = 1**. Podle výsledků výše (pro frézování: P = 0,85 kW, pro vrtání P = 0,86 kW) byl zvolen jako dostatečný výkon **P_v = 1 kW při otáčkách vřetena n_v = 5000 min^{-1}**

Postupem času byl díky dobré nabídce pořízen AC servomotor o výkonu **P_{sm} = 1,5 kW** a maximálními otáčkami **n_{max} = 5000 min^{-1}**. Další parametry motoru jsou uvedeny v tabulce Tab. 5

Z tohoto důvodu byl zvolen **převodový poměr** řemenového převodu **i = 1/1,5**.

Tento motor disponuje také enkoderem s vysokým rozlišením a elektromagnetickou brzdou. O řízení se bude starat 5,5 kW (výkonnný frekvenční měnič je použit z návrhu předcházejícího tomuto) frekvenční měnič LENZE 8200, který bude nastaven podle

parametrů servomotoru (parametry měniče v Tab. 6). Díky osazenému enkoderu bude do systému zavedena zpětná vazba a tím by se mohly zlepšit dosahované parametry. Jedná se stejný případ použití měniče jako v příkladu 15.3 v manuálu měniče [40].

Kontrola parametrů motoru:

Tab. 5 Parametry zvoleného motoru [39]

Název	Hodnota
Výrobce	Allen Bradley
Označení motoru	MPL – B320P – MK74AA
Výkon	P_{sm} = 1,5 kW
Maximální otáčky	n_{max} = 5000 min^{-1}
Stálý krouticí moment	M_{sm} = 3,05 Nm
Pracovní frekvence	f_{sm} = 0 ÷ 334 Hz
Převodový poměr	i = 1/1,5
Napětí	U_{sm} = 480 V
Proud	I_{sm} = 4,5 A

Tab. 6 Parametry frekvenčního měniče [40]

Název	Hodnota
Výrobce	Lenze
Označení motoru	8200 Vector
Výkon	P_{fm} = 5,5 kW
Pracovní frekvence	f_{fm} = 0 ÷ 650 Hz
Výstupní napětí bez síťové tlumivky	U_{out} = 0 ÷ 550 V
Jmenovitý výst. proud bez síťové tlumivky	I_{out} = 16,8 A

<u>Maximální otáčky vřetene:</u>

$$n_{vc} = \frac{n_m}{i} = \frac{5000}{\frac{1}{1{,}5}} = 7500\, min^{-1} \tag{15}$$

Vřeteno nesplňuje rozsah zvolených otáček. Nicméně rozdíl mezi otáčkami 7500 min^{-1} a 8000 min^{-1} není pro tuto aplikaci kritický. Kdyby byla konstrukce prováděna běžným způsobem (výběr a objednání u výrobce), byl by motor vybrán přesně na míru podle požadavků. Vzhledem k omezeným finančním možnostem a z toho plynoucím způsobem nákupu (čekání na nejvíce podobnou nabídku na bazarech za přijatelné peníze) shledávám tento parametr jako dostatečný. V případě potřeby vyšších otáček v budoucnu bude potřeba změnit převodový poměr či vyměnit motor.

Potřebný krouticí moment při daných otáčkách motoru:

Pro výpočet jsou použity parametry pro frézování, protože požadovaný výkon pro frézování je větší než pro vrtání.

$$M_m = \frac{M_c}{i} = \frac{1{,}57}{\frac{1}{1{,}5}} = 2{,}36\ Nm \tag{16}$$

$$n_m = n \cdot i = 5173 \cdot \frac{1}{1{,}5} = 3448{,}7\ min^{-1} \tag{17}$$

Z výpočtu plyne požadavek kr. momentu $\boldsymbol{M_m = 2{,}36\ Nm}$ *při otáčkách* $\boldsymbol{n_{mv} = 3448{,}7\ min^{-1}}$. *Dle grafů v katalogu měniče [40] pro standartní asynchronní motory je tento požadavek teoreticky splněn. V praxi však bude záležet, jaká bude reálná závislost krouticího momentu na otáčkách. Tuto závislost nelze vyčíst z katalogů, poněvadž se jedná o nezvyklou kombinaci AC servomotoru a frekvenčního měniče. Až v praxi bude ověřena použitelnost pohonu. Pokud zvolené řešení bude jevit nevhodné, pohon bude nahrazen.*

Použití referenčních nástrojů výše neomezuje volbu nástrojů jen menších, či těchto rozměrů. Tzn. lze použít i větší nástroje než zde uvedené. Pro mnohé nástroje je však potřeba upravit řezné podmínky aby dostačovaly parametry motoru.

4.3.1.3 Výpočet řemenu pro pohon vřetena

Pro pohon vřetena volím synchronní řemen firmy Continental Contitech, jejíž distributor pro českou republiku je firma TYMA [41]. Níže je uvedený postup, je proveden dle podkladů této firmy pro ploché ozubené řemeny s profilem zubu HTD [42]. Konkrétně vychází z ukázkového příkladu na str. 45 v katalogu [42] V tabulce Tab. 7 jsou uvedené vstupní parametry pro výpočet řemenu.

Tab. 7 Stanovené parametry pro výpočet řemenu [42]

Název	Hodnota
Zátěžný koeficient[1]	$c_2 = 1{,}3$
Koeficient zohledňující převodový poměr	$c_3 = 0{,}1$
Koeficient zohledňující dobu běhu[2]	$c_4 = 0{,}2$
Maximální otáčky servomotoru	$n_k = 5000\ min^{-1}$
Výkon servomotoru	P = 1,5 kW
Převodový poměr	i = 1/1,5
Osová vzdálenost řemenic	a = 154 mm

[1]Koeficient bere v úvahu použití řemenu ve stanovených provozech. Byla zvolena aplikace v obráběcích strojích, konkrétně frézkách. Kde bude elektromotor používán s malým rozběhovým momentem.

[2]Doba byla zvolena jako 10-16 provozních hodin každý den.

Celkový výpočetní koeficient:

$$c_0 = c_2 + c_3 + c_4 = 1{,}3 + 0{,}1 + 0{,}2 = 1{,}6 \tag{18}$$

Výpočetní přenášený výkon:

$$P_0 = P \cdot c_0 = 1{,}5 \cdot 1{,}6 = 2{,}4\ kW \tag{19}$$

Dle diagramu v katalogu byl zvolen řemen: HTD 5M,
zubová rozteč řemenu: t = 5 mm.

Průměr hnací řemenice byl zvolen:
d_{w1} = 38,2 mm, počet zubů hnací řemenice z_g = 24

Počet zubů hnané řemenice:

$$z_k = \frac{z_g}{i} = \frac{24}{\frac{1}{1{,}5}} = 36 \tag{20}$$

Počet zubů z_k = 36 odpovídá průměru řemenice: D_{w2} = 57,3 mm

Délka řemenu:

$$L_w = 2 \cdot a + \frac{t}{2} \cdot (z_g + z_k) + \frac{\left[\frac{t}{\pi} \cdot (z_g - z_k)\right]^2}{4 \cdot a} \tag{21}$$

$$L_w = 2 \cdot 154 + \frac{5}{2} \cdot (24 + 36) + \frac{\left[\frac{5}{\pi} \cdot (24 - 36)\right]^2}{4 \cdot 154} = 458{,}59 \text{ mm}$$

Z vyráběných délek řemene volím délku: ***L_w = 460 mm****, s počtem zubů:* ***z_w = 92***

Hodnoty pro určení Centre distance factor:

$$z_w - z_k = 92 - 36 = 56 \tag{22}$$
$$z_g - z_k = 24 - 36 = -12 \tag{23}$$

Standartní postup výše je vytvořen pro převod do pomala ($z_g < z_k$). Tudíž pro hodnotu -12 nelze v tabulce nalézt odpovídající Centre distance factor. Proto je potřeba se na tento případ (pouze pro tento výpočet) podívat obráceně:

$z_g = 36$; $z_k = 24$; $z_w = 92$

$$z_w - z_k = 92 - 24 = 68 \quad (24)$$
$$z_g - z_k = 36 - 24 = 12 \quad (25)$$

Z tabulky byl určen Centre distance factor = 30,941

Přepočet osové vzdálenosti:

$$a = \text{Centre distance factor} \cdot t = 30{,}941 \cdot 5 = 154{,}71mm \quad (26)$$

Rychlost řemenu (obvodová rychlost):

$$v = \frac{t \cdot z_k \cdot n_k}{60 \cdot 10^3} = \frac{5 \cdot 36 \cdot 5000}{60 \cdot 10^3} = 15\, m \cdot s^{-1} \quad (27)$$

Úhel opásání malé řemenice:

$$\beta = 2 \cdot \arccos\left(\frac{t \cdot (z_k - z_g)}{2 \cdot \pi \cdot a}\right) = 2 \cdot \arccos\left(\frac{5 \cdot (36 - 24)}{2 \cdot \pi \cdot 154{,}71}\right) = 172{,}89° \quad (28)$$

Počet zubů v záběru malé řemenice:

$$z_e = z_g \cdot \frac{\beta}{360} = 24 \cdot \frac{172{,}89}{360} = 11{,}53 \quad (29)$$

Počet zubů v záběru $z_e > 6$, **koeficient počtu zubů v záběru** bude: $\mathbf{c_1 = 1}$
Typ řemene je HTD 5M a délka L_w = 460 mm, tzn. leží v rozmezí 441 až 500
K**oeficient délky řemene** tedy bude: $\mathbf{c_5 = 0{,}9}$

Šířka řemene:

Požadavek pro přenos výkonu:

$$P \cdot c_0 \leq P_r \cdot c_1 \cdot c_5 \rightarrow P_r \geq \frac{P \cdot c_0}{c_1 \cdot c_5} \quad (30)$$

$$P_r \geq \frac{P \cdot c_0}{c_1 \cdot c_5} = \frac{1{,}5 \cdot 1{,}6}{1 \cdot 0{,}9} = 2{,}67\, kW$$

Při otáčkách n_{vc} = 7500 min^{-1} a počtu zubů menší řemenice z_g = 24

Volím řemen šířky: ***b = 25 mm***

Výkon přenášený tímto řemenem: P_R = 3,999 kW pro otáčky n = 7000 min^{-1} Z tabulky na str. 53 v literatuře [42] je zřejmé, že s vyššími otáčkami přenášený výkon roste.

Řemen se zvolenou šířkou tedy vyhovuje.

Výsledné označení dílů pro objednávku:

Řemen: HTD 460 – 5M – 25
Řemenice: 24-05M-25 6F; 36-05M-25 6F

Kontrola předpětí v řemenu metodou průhybu

Testovací síla pro řemeny 5M:

$$F_e = 2{,}6b + 15 = 2{,}6 \cdot 25 + 15 = 80\ N \tag{31}$$

Efektivní tahová síla:

$$F_u = \frac{60 \cdot 10^6 \cdot P}{t \cdot z_k \cdot n_k} = \frac{60 \cdot 10^6 \cdot 1{,}5}{5 \cdot 36 \cdot 5000} = 100\ N \tag{32}$$

Pro řemen s roztečí zubů: t = 5 mm a efektivní tahovou sílu F_u = 100 N byl z tabulky odečten **tahový součinitel**: $\frac{t_e}{L_f} \cdot 1000 = 47{,}5$

Délka volné větve řemene (od tečného bodu hnané k tečnému bodu hnací řemenice):

$$L_f = a \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = 154{,}71 \cdot \sin\left(\frac{172{,}89}{2}\right) = 154{,}41mm \tag{33}$$

Průhyb řemene:

$$t_e = \frac{L_f}{1000} \cdot (tahový\ součinitel) = \frac{154{,}41}{1000} \cdot (47{,}5) = 7{,}3mm \tag{34}$$

Z tohoto postupu vyplývá, že když bude testovací síla ***F_e = 80 N*** *působit v polovině délky volné větve řemene,* ***průhyb*** *řemene by měl činit* ***7,3 mm****.*

4.3.2 Návrh pohonů os

Na upravované frézce byly před touto přestavbou použity trapézové šrouby. O pohon šroubů na všech osách se staral jeden společný motor, jehož krouticí moment byl pomocí převodovek přenášen na potřebnou osu. Při pohledu na jednotlivé převodovky a různé mechanické spojky aj. lze žasnout nad promyšleností tohoto řešení. Zde se naplno projevuje, že v jednoduchosti je síla.

Nicméně pro CNC stroj je stávající řešení nevhodné. Proto byla zvolena výměna trapézových šroubů za kuličkové a osazení každé osy jedním servomotorem. Pro přenos krouticího momentu ze servomotoru na šroub byl zvolen řemenový převod.

4.3.2.1 Volba šroubů

Pro osy X a Y byly zvoleny kuličkové šrouby: 2x Steinmeyer 1416/10.25.3,5.4 P1 [44]
Pro osu Z byl zvolen kuličkový šroub: NSK W3209G – 27PY – C5Z

4.3.2.2 Návrh pohonu osy Y

Vstupní hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v Tab. 8. Empirické hodnoty jako účinnosti apod. byly uvedeny u postupu výpočtu. [43] Hodnota působící síly vychází z výpočtu č. (8), na str. 34.

Tab. 8 Vstupní hodnoty pro výpočet krouticího momentu na šroubu osy Y [43]

Název	Hodnota
Účinnost vedení	$\eta_v = 80\%$
Účinnost šroubu	$\eta_š = 92\%$
Účinnost ložiska	$\eta_L = 99\%$
Účinnost vloženého (řemenového) převodu	$\eta_1 = 99\%$
Součinitel kluzného tření vedení	$f_1 = 0{,}15$
Ekvivalentní souč. tření v KŠ a matici redukovaný na poloměr šroubu	$f_2 = 0{,}003$
Ekvivalentní souč. tření redukovaný na poloměr čepu	$f_3 = 0{,}003$
Průměr šroubu pro uložení v ložisku	$d_L = 20$ mm
Střední průměr šroubu	$d_s = 22$ mm
Délka lože (styčných ploch vedení)	L = 423 mm
Velikost působící síly (síla vyvinutá frézováním)	$F_A = F_{cf} = 157$ N
Dynamická únosnost šroubu	$C_A = 17{,}4$ kN
Síla předpětí kuličkové matice	$F_p = 1392$ N
Vzdálenost působící síly od vedení*	$a_v = 150$ mm

Hmotnost posouvaných hmot	m_p = 160 kg
Úhel sklonu vedení	α = 0°
Stoupání kuličkového šroubu	s_k = 10 mm
Převodový poměr řemenového převodu	i = 1,5
Tíhové zrychlení	g = 9,81 m · s^{-2}

*pozn.: Tato vzdálenost je měřena od hypotetické špičky nástroje v upínači weldon při úplném vysunutí pinoly.

Zde uvedený postup je odlišný od standartního, kdy se nejprve stanoví parametry, které je potřeba dosáhnout a z nich se navrhují komponenty, zde servomotory, které se pak objednají. Z důvodu vlastního financování by byl standartní postup příliš nákladný. Byl proto zvolen postup, při němž se zjistily parametry servomotorů na podobných strojích a podle nich byly na internetových bazarech vyhledávány servomotory v co nejlepším stavu. Tento postup není finančně tak náročný jako standartní, vyžaduje však mnohem více času, kdy je potřeba hledat a sledovat případné nabídky. Po dlouhém hledání a čekání na různé nabídky se objevil sklopný a otočný stůl, jehož natáčení zajišťovaly dva servomotory značky SIEMENS řízené servodrivery SIEMENS MASTERDRIVES MC pomocí PLC SIMATIC S7 - 300.

Pro pohon osy Y byl zvolen servomotor SIEMENS 1FK6060. Parametry tohoto servomotoru jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Parametry servomotoru SIEMENS 1FK6060 [45]

Název	**Hodnota**
Jmenovitý krouticí moment	M_N = 4 Nm
Maximální krouticí moment	M_{max} = 17.7 Nm
Jmenovité otáčky	n_N = 3000 min^{-1}
Maximální otáčky	n_{max} = 6600 min^{-1}
Výkon při jmenovitých otáčkách	P_N = 1,26 kW

Rychlost posuvu při jmenovitých otáčkách je na takovýto stroj příliš vysoká. Proto volím i vzhledem prostorovým nárokům převodový poměr i = 1,5. Tento převod bude realizován ozubeným řemenem. Převod ozubeným řemenem byl zvolen z důvodu bezvůlovosti a schopnosti tlumit rázy.

Rychlost posuvu stolu (rychloposuv)

$$f_r = \frac{n_N}{i} \cdot s_k = \frac{3000}{1{,}5} \cdot 10 = 20000\, mm \cdot min^{-1} \tag{35}$$

Výpočet potřebného krouticího momentu

Následující postup výpočtů byl proveden s podporou literatury [43].

A) Statické řešení

Zátěžový moment od tíhové síly

$$M_G = \frac{m_p \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_1} = \frac{160 \cdot 9{,}81 \cdot \sin(0) \cdot 0{,}01}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}99} = 0\ Nm \tag{36}$$

Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot

$$M_{GT} = \frac{m_p \cdot g \cdot cos(\alpha) \cdot f_1 \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_1} \tag{37}$$

$$M_{GT} = \frac{160 \cdot 9{,}81 \cdot \cos(0) \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}01}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}99} = 0{,}252\ Nm$$

Moment zátěže od třecích sil v ložisku

$$M_L = \frac{0{,}5 \cdot (F_A + m_p \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot f_1) \cdot d_L \cdot f_3}{i \cdot \eta_1} \tag{38}$$

$$M_L = \frac{0{,}5 \cdot (157 + 160 \cdot 9{,}81 \cdot cos(0) \cdot 0{,}15) \cdot 0{,}02 \cdot 0{,}003}{1{,}5 \cdot 0{,}99}$$

$$M_L = 0{,}008\ Nm$$

Ztrátový moment na kuličkovém šroubu

$$M_{KSM} = \frac{F_p \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_1} \cdot \left(1 - \eta_{\check{s}}^2\right) + \frac{0{,}5 \cdot (F_A + m_p \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot f_1) \cdot d_s \cdot f_2}{i \cdot \eta_1} \tag{39}$$

$$M_{KSM} = \frac{1392 \cdot 0{,}01}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}99} \cdot (1 - 0{,}92^2) + \frac{0{,}5 \cdot (157 + 160 \cdot 9{,}81 \cdot cos(0) \cdot 0{,}15) \cdot 0{,}022 \cdot 0{,}003}{1{,}5 \cdot 0{,}99}$$

$$M_{KSM} = 0{,}238\ Nm$$

Třecí síla vznikající ve vedení v důsledku tíhy a vyosení působící síly

$$F_{TV} = \left(\frac{3 \cdot F_A \cdot a_v}{L}\right) \cdot f_1 + m_p \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \tag{40}$$

$$F_{TV} = \left(\frac{3 \cdot 157 \cdot 0{,}15}{0{,}423}\right) \cdot 0{,}15 + 160 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}15 \cdot \cos(0) = 260{,}49\ N$$

Celková účinnost

$$\eta_{cy} = \eta_v \cdot \eta_š \cdot \eta_L \cdot \eta_1 = 0{,}8 \cdot 0{,}92 \cdot (0{,}99 \cdot 0{,}99) \cdot 0{,}99 = 0{,}714 \tag{41}$$

Třecí moment vzniklý v důsledku třecí síly

$$M_F = \frac{F_{TV} \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_1} = \frac{260{,}49 \cdot 0{,}01}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}99} = 0{,}279\ Nm \tag{42}$$

Celkový statický moment zátěže redukovaný na hřídel motoru

$$M_{zshrm} = M_G + M_{GT} + M_L + M_{KSM} + M_F \tag{43}$$
$$M_{zshrm} = 0 + 0{,}252 + 0{,}008 + 0{,}238 + 0{,}279 = 0{,}777\ Nm$$

Minimální potřebný krouticí moment motoru

$$M_{m1} = \frac{F_A \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_{cy}} + M_{zshrm} = \frac{157 \cdot 0{,}01}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}714} + 0{,}777 = 1{,}011\ Nm \tag{44}$$

B) Kinematické parametry

Stanovení rychloposuvu a zrychlení

Původní požadavek na rychloposuv byl 5000 $mm \cdot min^{-1}$. Po volbě servomotoru je vidno, že teoretický rychloposuv při jmenovitých otáčkách by byl 20000 $mm \cdot min^{-1}$. Vzhledem k velikosti stroje a úzkému kluznému vedení volím rychloposuv f_r = 10000 $mm \cdot min^{-1}$. **Zrychlení** volím $\mathbf{a_r = 0{,}2 \cdot g = 0{,}2 \cdot 9{,}81 = 1{,}96\ m \cdot s^{-2}}$.

Doba rozjezdu stolu z klidu na rychloposuv (při předpokladu konstantního zrychlení)

$$t_r = \frac{f_r}{a_r} = \frac{\frac{10000}{10^3 \cdot 60}}{1{,}96} = 0{,}085\ s \tag{45}$$

Dráha rozjezdu stolu z klidu na rychloposuv (při předpokladu konstantního zrychlení)

$$s_r = \frac{1}{2} \cdot a_r \cdot t_r^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}96 \cdot 0{,}085^2 = 7{,}08\ mm \tag{46}$$

Úhlové zrychlení šroubu

$$\varepsilon_y = \frac{a_r \cdot 2 \cdot \pi}{s_k} = \frac{1{,}96 \cdot 2 \cdot \pi}{0{,}01} = 1232{,}76\ rad \cdot s^{-2} \tag{47}$$

Úhlové zrychlení motoru

$$\varepsilon_m = \varepsilon_y \cdot i = 1231{,}5 \cdot 1{,}5 = 1849{,}14\ rad \cdot s^{-2} \tag{48}$$

C) Dynamické řešení

Tab. 10 Rozměry potřebné pro další výpočty

Název	Hodnota
Šířka řemenic	b = 30 mm
Průměr malé (hnací) řemenice	d_1 = 51,3 mm
Průměr velké (hnané) řemenice	d_2 = 77 mm
Průměr díry v malé (hnací) řemenici	d_{1d} = 20 mm
Průměr díry ve velké (hnací) řemenici	d_{2d} = 20 mm
Moment setrvačnosti rotoru motoru [39]	$J_{mot} = 7{,}8 \cdot 10^{-4}$ kg·m^2
Délka šroubu osy Y	l_k = 474 mm
Průměr šroubu osy Y	d_k = 25 mm
Hustota oceli [34]	ρ = 7800 kg·m^{-3}

Moment setrvačnosti kuličkového šroubu

$$J_S = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot l_k \cdot \left(\frac{d_k}{2}\right)^4 \tag{49}$$

$$J_S = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 7800 \cdot 0{,}474 \cdot \left(\frac{0{,}025}{2}\right)^4 = 1{,}42 \cdot 10^{-4}\ m^2 \cdot kg$$

Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot

$$J_m = m_p \cdot \left(\frac{s_k}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 160 \cdot \left(\frac{0{,}01}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 4{,}053 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot kg \tag{50}$$

Moment setrvačnosti malé řemenice

$$J_1 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot b \cdot \left[\left(\frac{d_1}{2}\right)^4 - \left(\frac{d_{1d}}{2}\right)^4\right] \tag{51}$$

$$J_1 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 7800 \cdot 0{,}03 \cdot \left[\left(\frac{0{,}0513}{2}\right)^4 - \left(\frac{0{,}02}{2}\right)^4\right] = 1{,}55 \cdot 10^{-4}\ m^2 \cdot kg$$

Moment setrvačnosti velké řemenice

$$J_2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot b \cdot \left[\left(\frac{d_2}{2}\right)^4 - \left(\frac{d_{2d}}{2}\right)^4\right] \tag{52}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 7800 \cdot 0{,}03 \cdot \left[\left(\frac{0{,}077}{2}\right)^4 - \left(\frac{0{,}02}{2}\right)^4\right] = 8{,}04 \cdot 10^{-4}\ m^2 \cdot kg$$

Celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + \frac{J_s}{i^2} + \frac{J_m}{i^2} \tag{53}$$

$$J_{rhm} = 7{,}8 \cdot 10^{-4} + 1{,}554 \cdot 10^{-4} + \frac{8{,}039 \cdot 10^{-4}}{1{,}5^2} + \frac{1{,}42 \cdot 10^{-4}}{1{,}5^2} + \frac{4{,}053 \cdot 10^{-4}}{1{,}5^2}$$

$$J_{rhm} = 15{,}36\ \cdot 10^{-4}\ m^2 \cdot kg$$

Zátěžový moment od tíhové síly

$$M_{Gd} = M_G = 0\ Nm \tag{54}$$

Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot

$$M_{GTd} = M_{GT} = 0{,}252\ Nm \tag{55}$$

Ztrátový moment na kuličkovém šroubu

$$M_{KSMd} = \frac{F_p \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_1} \cdot \left(1 - \eta_s^2\right) + \frac{0{,}5 \cdot m_p \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot f_1 \cdot d_s \cdot f_2}{i \cdot \eta_1} \tag{56}$$

$$M_{KSMd} = \frac{1392 \cdot 0{,}01}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}99} \cdot (1 - 0{,}92^2) + \frac{0{,}5 \cdot 160 \cdot 9{,}81 \cdot cos(0) \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}022 \cdot 0{,}003}{1{,}5 \cdot 0{,}99}$$

$$M_{KSMd} = 0{,}234\ Nm$$

Celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru

$$M_{zdrhm} = M_{Gd} + M_{GTd} + M_{KSMd} = 0 + 0{,}252 + 0{,}234 = 0{,}487\ Nm \tag{57}$$

Velikost potřebného momentu motoru

$$M_{m2} = J_{rhm} \cdot \epsilon_m + M_{zdrhm} \tag{58}$$
$$M_{m2} = 15{,}36\ \cdot 10^{-4} \cdot 1849{,}14 + 0{,}487 = 3{,}33\ Nm$$

Z předchozích výpočtů vyplývají dva požadavky na krouticí moment motoru:

Moment statického řešení: M_{m1} = 1,01 Nm
Moment kinematického řešení: M_{m2} = 3,33 Nm

Jmenovitý moment navrženého motoru je: M_N = 4 Nm. Moment motoru je tedy dostatečný pro výše zvolené podmínky. Servomotory se dají na krátkou dobu velmi přetížit. Maximální moment servomotu (viz Tab. 9): M_{max} = 17,7 Nm. Může tedy nastat situace, že díky tomu při sestavení frézky a ověřování vypočtených hodnot bude možné dosáhnout vyšších hodnot než zde navržených. Bude pak na zvážení, zdali tuto možnost přetížitelnosti využít.

4.3.2.4 Parametry os X, Z

Parametry zbylých os X a Z byly navrhovány obdobným postupem, jenž je uveden výše.

Tab. 11 Parametry os X,Z

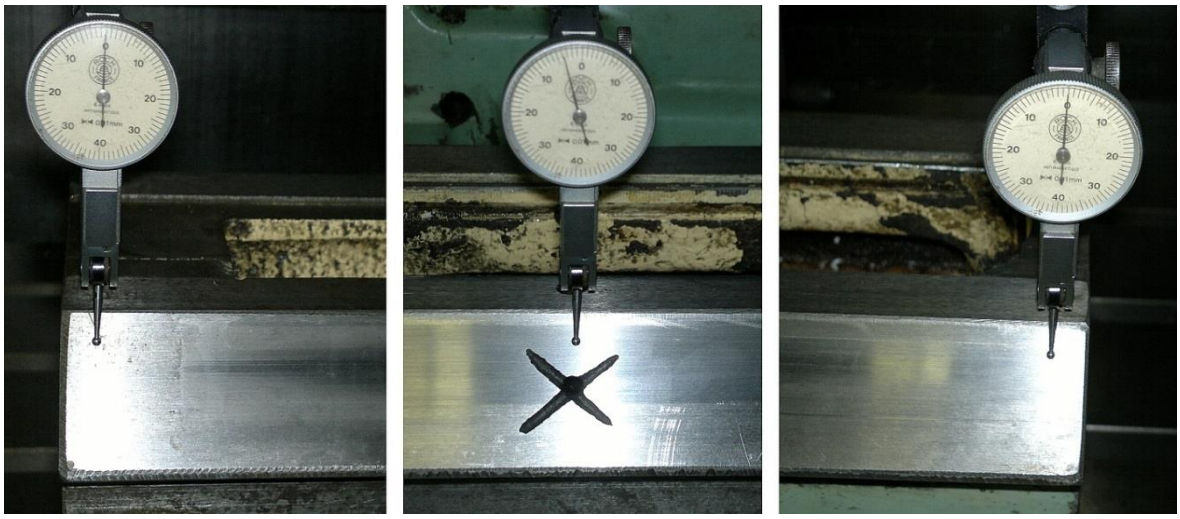
Název parametru	Osa X	Osa Z
Stoupání šroubu	s_{kX} = 10 mm	s_{kZ} = 10 mm
Průměr šroubu	d_{kX} = 25 mm	d_{kZ} = 32 mm
Výkon servomotoru	P_X = 0,82 kW	P_Z = 0,82 kW
Krouticí moment servomotoru	M_X = 1,2 Nm	M_Z = 3,2 Nm
Otáčky servomotoru	n_{1X} = 6000 min^{-1}	n_{1Z} = 3000 min^{-1}
Průměr hnací řemenice	d_{1X} = 20 mm	d_{1Z} = 20 mm
Průměr hnané řemenice	d_{2X} = 20 mm	d_{2Z} = 20 mm
Převodový poměr	i_X = 4	i_Z = 2
Řemen	HTD 425 - 5M - 25	HTD 560 - 8M - 20
Teoretický rychloposuv	f_{Xt} = 15000 mm · min^{-1}	f_{Zt} = 15000 mm · min^{-1}
Volený rychloposuv	f_X = 10000 mm · min^{-1}	f_Z = 10000 mm · min^{-1}

Výsledné hodnoty rychloposuvů budou nastaveny podle výsledků ze zkoušení v praxi. Tyto hodnoty se tak mohou od těch volených lišit.

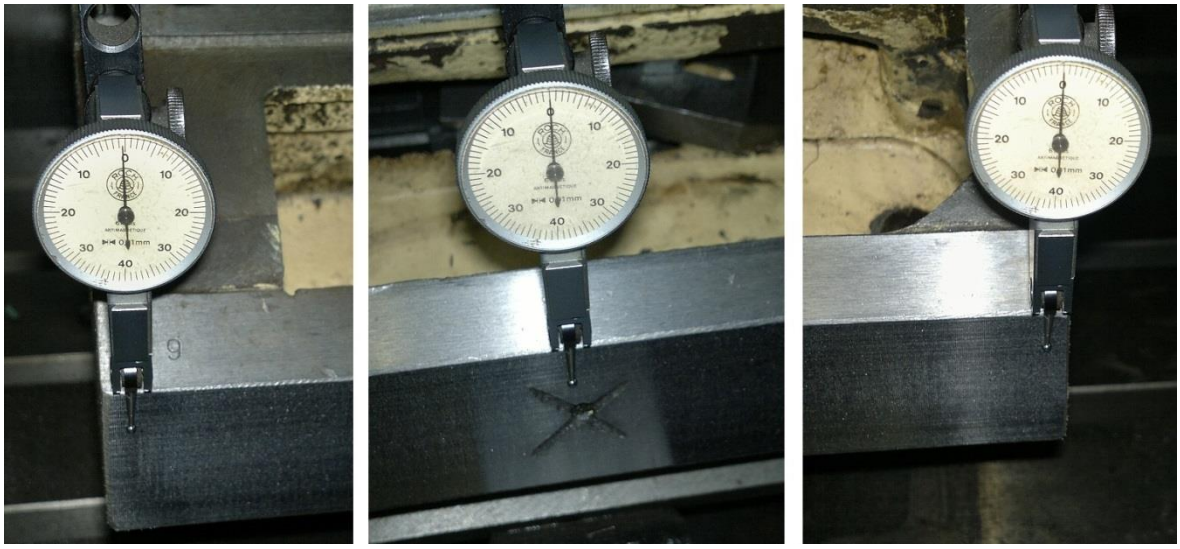
4.3.2.5 Repas vedení osy X

Stroj byl v době přestavby sice v dobrém stavu, ale byly zde také známky opotřebení. Po proměření rovinností a kolmostí jednotlivých vedení byly zjištěny odchylky. Odchylky nenabývaly závratných hodnot (např. odchylka rovinnosti činila 0,04 mm na 720 mm dlouhé horní ploše vedení osy X, viz Obr. 19) a je možné, že by při funkčnosti neměly zásadní vliv na přesnost. Ale i přesto bylo rozhodnuto tyto odchylky minimalizovat. Z důvodu poměrně velké náročnosti a ceně různých technologií broušení či zaškrabávání

byla zvolena metoda frézování. Tato metoda byla také nejdostupnější. Podle dosažených výsledků (Obr. 20) lze také tvrdit, že tato technologie byla pro opravu dostačující.



Obr. 19 Původní stav vedení osy X



Obr. 20 Stav vedení osy X po repasu

4.3.3 Návrh mazání

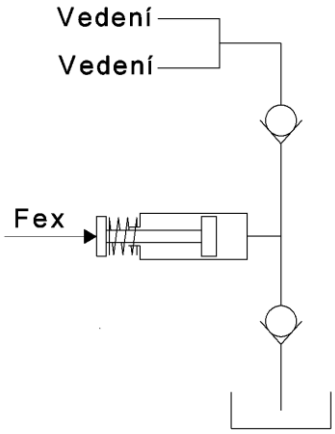
Jelikož je tento projekt přestavba, tak zde na rozdíl od konstrukce nového stroje je mazání již integrováno. Pro mazání je zde použita ruční maznice, pomocí níž obsluha stroje v určitých časových intervalech provede mazání. Tento způsob by bylo možno použít, ale jelikož je stroj automatizován, tak ani mazání nebude z automatizace vynecháno. Výhodou jsou však už existující mazací kanálky, které budou použity. Vzhledem k vysoké ceně centrálních mazání bylo navrhnuto mazání nové. Mazání bude provedeno jako ztrátové.

Bylo zvoleno celkem 6 mazacích míst a to: 3x kuličková matice a 3x kluzné vedení (vedení je vždy mazáno na dvou místech a tato jsou v mazacím okruhu spojena).

Jeden z problémů mazání je rozdělení oleje do jednotlivých míst. Při použití jednoduché rozváděcí kostky hrozí, že při zvýšení odporu na jednom výstupu, bude do něj omezen přísun oleje a do ostatních mazacích míst poputuje přebytek. U prodávaných centrálních mazání je tento problém řešen vhodnými rozdělovači (např. progresivní rozdělovač) či jiným způsobem. Na obrázku Obr. 21 jsou mazací systémy od firmy SKF.

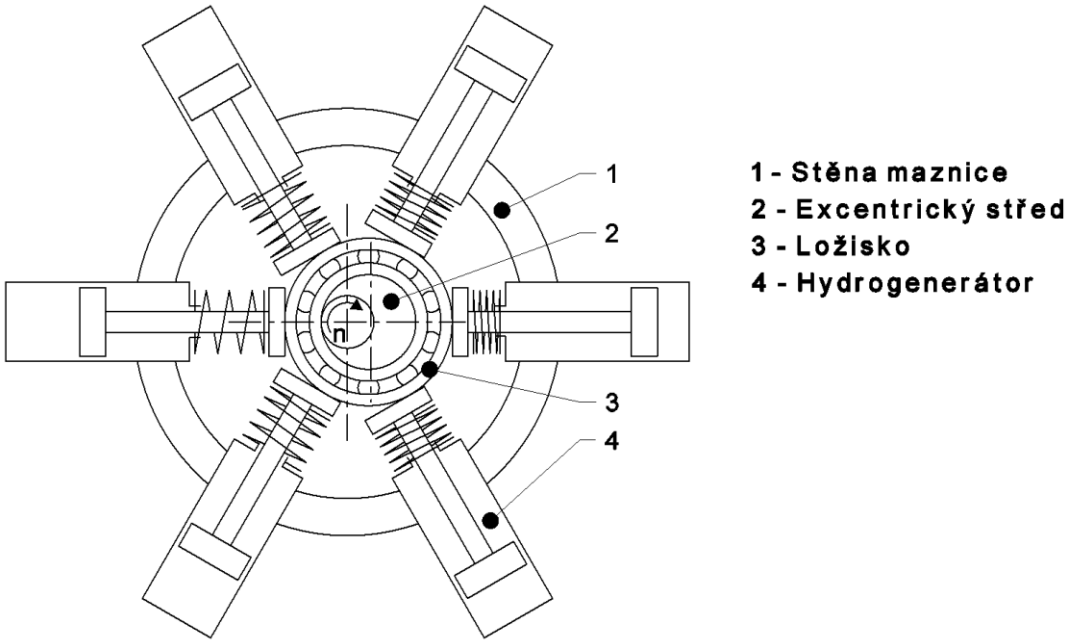
Obr. 21 Vícebodobá automatická maznice řady LAGD 1000 (vlevo)[47], progresivní mazání (vpravo) [46]

Tyto prvky jsou poměrně drahé, proto byl zvolen systém mazání pomocí jednocestných ventilů. Kdy je do každé z šesti větví olej vpravován samostatně. Nevýhodou tohoto mazání je složité přidání mazacích míst. Na Obr. 22 je schéma jedné z šesti mazacích větví.



Obr. 22 Schéma jedné větve mazacího okruhu

Z obrázku je patrné, že obvod neobsahuje žádné bezpečnostní prvky. Počítá se s tím, že výstup mazání ať už do matic, či do vedení nebude zacpán a tudíž by neměla nastat kolize. Pro případ kolize lze přidat do výtlačné větve pojistný ventil, který by v případě nemožnosti výtoku přepustil olej zpět do nádrže. Původní mazání bude realizováno dle schématu na Obr. 22. V praxi se ukáže, zdali je toto řešení vyhovující a v případě že ne, budou provedeny potřebné úpravy. Na píst působí síla Fex, která je způsobena otáčením excentrického středu. Tato síla stlačuje píst a vytváří výtlak. Po uvolnění je píst vysunut silou pružiny a tím dojde k nasátí oleje. Konstrukční uspořádání navrženého pístového čerpadla je zobrazeno na Obr. 23.



Obr. 23 Konstrukční uspořádání pístové maznice

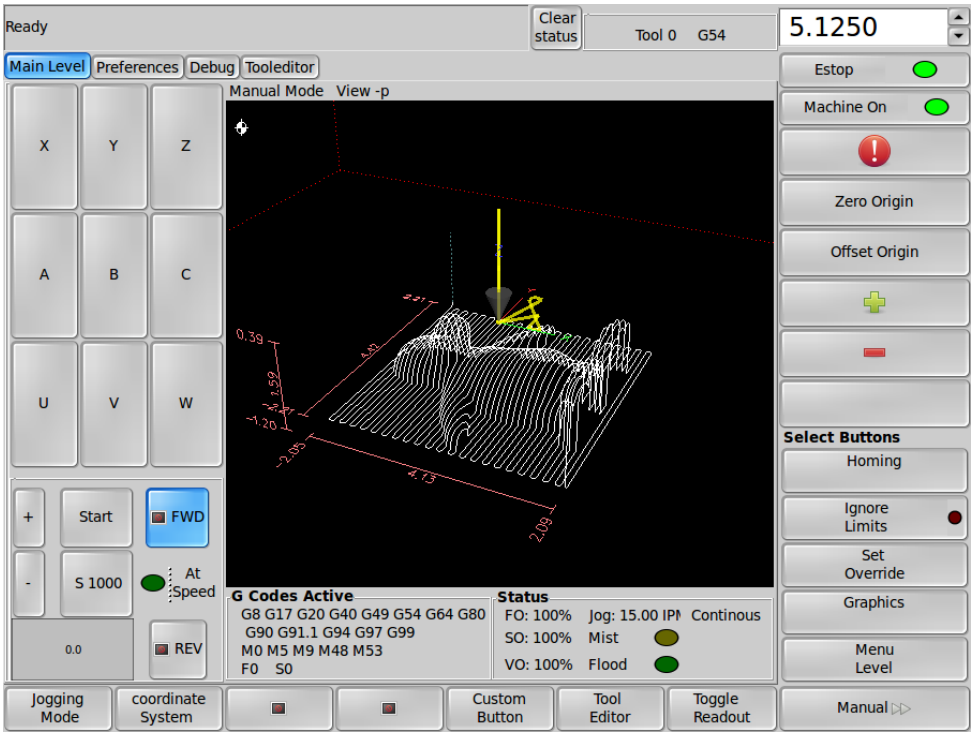
Parametry automatické maznice:

- pohon DC motorem s převodem: - výstupní otáčky: $n_m = 45\ min^{-1}$
  - výstupní krouticí moment: $M_{ma} = 0{,}64$ Nm
- průměr válců maznice: $d_m = 10$ mm
- pracovní zdvih: $z_m = 8$ mm
- mazací průtok jedné větve: $Q_m = 0{,}028\ l \cdot min^{-1}$
- automatické dávkování (motor bude spuštěn a zastaven ve stanovenou dobu)

4.3.4 Volba řídicího systému

V prvních fázích projektu byly pokusy sehnat starší CNC systém od známých firem (Sinumerik, Heidenhain), které byly ze strojů, u nichž proběhla modernizace systému. Tyto pokusy skončily nezdarem z důvodů, jako jsou: příliš vysoká cena, nekompletnost systému popř. zaniknutí komunikace s prodejcem.

Nakonec byl zvolen open source program **LinuxCNC** ver. **2.7**. Program funguje na PC pod operačním systémem Linux. Tento software je velmi modulární a díky otevřenosti zcela dostupný jakýmkoliv úpravám. Díky tomu lze přestavbu nejen provést tak, jak je popsáno výše ale později také jakkoliv upravovat (např. přidat další řízené osy apod.) bez nutnosti výměny sytému.

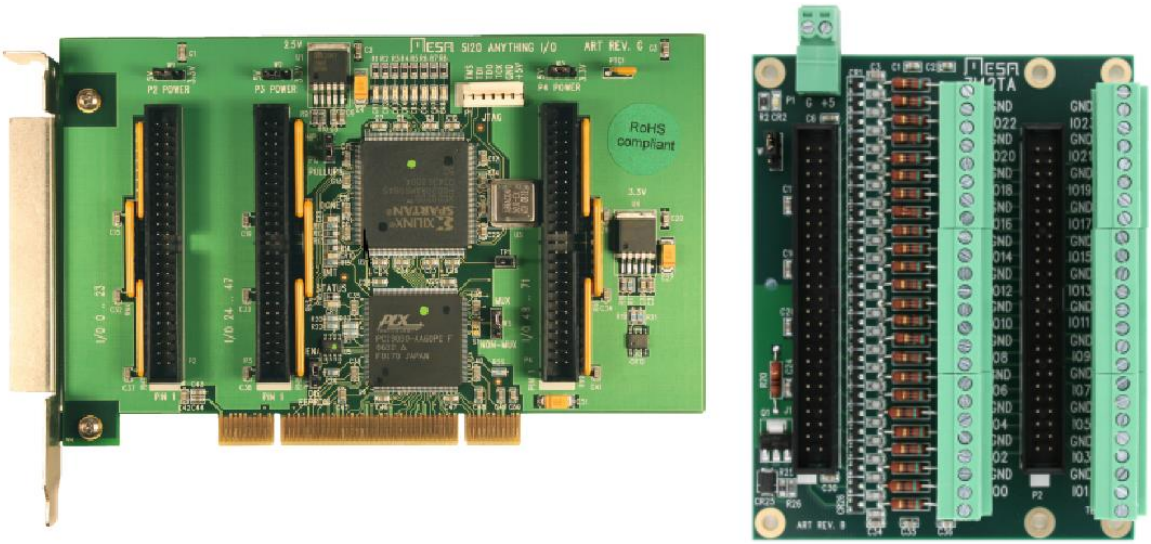


Obr. 24 Jedna z mnoha variant grafického uživatelského rozhraní LinuxCNC [48]

CNC řízený stroj lze řídit např. pomocí paralelního portu v PC. V tomto případě ale funkčnost záleží na PC, jeho výkonu a stabilitě. PC generuje pulsy a posílá je ovladačům motorů. Frekvence těchto pulsů závisí na rychlosti pohybu stroje. Může se tak stát, že PC pro danou rychlost není schopno vygenerovat pulsy s vhodnou frekvencí. Proto bylo zvoleno řízení pomocí rozšiřovacích karet značky MESA [49, 50].

Při původním testování CNC systému byly využity karty: 5i20 a 2x7i42TA. Karta 5i20 je vložena do slotu PCI slotu a slouží jako náhrada výpočetní části PC potřebné pro CNC systém. Karta tak generuje pulsy téměř nezávisle na celkovém výkonu PC. Do karty jsou pomocí 50 žílového kabelu připojeny dvě karty 7i42TA. Tyto karty slouží jako

protizkratová ochrana karty 5i20. Funguje také jako ochrana před vysokým napětím a také jako proudové omezení vstupů.



Obr. 25 Karty Mesa 5i20 (vlevo) [49], 7i42TA (vpravo) [50]

Specifikace karty 5i20:

- čip: 200K gate Xilinx FPGA (plně programovatelné hradlové pole),
- 72 digitálních vstupů/výstupů (záleží na naprogramování),
- Výstupní napětí: 3,3V nebo 5V,
- Výstupní proud: celkový 400mA,

3.4 Finanční zhodnocení přestavby

Přestavba není jen záležitostí této práce, ale fyzicky probíhá. Zde je přehled dosavadních investic:

Položka	**Cena (Kč)**
Kuličkové šrouby (X, Y, Z)	15 000,-
Servomotor MPL B320P	5000,-
Frekvenční měnič Lenze 8200 Vector	5000,-
Polotovary ocel	4500,-

Vřeteno	5000,-
Servomotory + drivery (osy X, Y, Z)	17 000,-
Vzduchotechnika	800,-
Řemeny, řemenice, svěrná pouzdra	5000,-
Ložiska	6000,-
Rozšiřovací karty (Mesa)	10 500,-
Hydraulické prvky (hadice, ventily apod.)	1000,-
Celkem	**74 800,-**

Výsledná cena ale není konečná. Přestavba na praktické úrovni stále probíhá a zde uvedené prvky nejsou ani zdaleka všechny, které budou potřeba. Nejvíce zatím chybí elektrických prvků, které zatím nebylo potřeba (probíhala hlavně výroba různých součástí stroje). Podle předběžných odhadů by výsledná částka neměla přesáhnout 90 000 Kč.

5 ZÁVĚR

Na začátku práce je provedeno základní rozdělení frézek. Následuje rešerše na témata související s přestavbou frézky, která je provedena tak aby bylo možno poukázat na rozdíly mezi jednotlivými způsoby řízení a tím i na rozdílné použité prvky. Dále je provedena rešerše na některé tyto prvky, jíž jsem se snažil provést z pohledu člověka aplikující tyto poznatky v praxi. U prvků použitých při přestavbě je snaha poukázat na jejich různé vlastnosti a možnosti použití. Jelikož se jedná o přestavbu ručně řízeného stroje na CNC stroj, nemohla chybět ani krátká rešerše týkající se CNC systému. Tato část práce je věnována použití CNC systémů, popř. jejich možnosti konfigurovatelnosti a cenové náročnosti. Je zde také přehled nejznámějších výrobců CNC systémů. Druhá půlka mé práce je věnována probíhající přestavbě konkrétní frézky, kdy byla nejprve provedena tvorba modelů. Sestava pak byla upravována a obohacována o další díly použité při přestavbě. Výpočty vybraných komponent jsou uvedeny v této práci. Vzhledem k tomu, že se jedná o bakalářskou práci a téma přestavby je velice rozsáhlé nebyly zde uvedeny ani zdaleka všechny potřebné výpočty. Přesto jsou zde uvedeny navrhnuté parametry např. pohonů jednotlivých os. V další části je zmíněn repas vedení osy X a dle mého výborné dosažené výsledky. Následuje návrh mazání, kdy bylo navrhnuto mazání ztrátové. Navržená maznice by měla provádět rovnoměrné mazání jednotlivých mazacích míst bez ohledu na odporu na výstupech. Jako předposlední téma je uvedena volba řídicího systému. S ohledem na cenu a možnosti přizpůsobení byl zvolen CNC systém fungující pod OS na PC. Možnost přizpůsobení je pro mne velmi důležitá. Při předpokladu zdárné přestavby plánuji projekt dále upravovat. Např. přidat automatickou výměnu nástrojů, či další řízené osy aj. Pro omezení vlivu stability a výkonu PC jsem zvolil cestu rozšiřovacích karet. V závěru práce je provedeno finanční zhodnocení přestavby. Jelikož byly komponenty sháněny po bazarech, je výsledná cena výrazně nižší než u komponent na zakázku. Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost čekání na vhodné nabídky. Popř. rychlé ujasnění si co je potřeba při objevení takové nabídky. Výsledná cena se však i přesto může jevit vysoká. Pro mne jsou však také velmi cenné zkušenosti, jež mohu při tomto projektu nabýt. Realizace přestavby je nyní stále ve fázi výroby dílů. Tato výroba je o to náročnější, protože je potřeba díly pasovat. Jelikož celou přestavbu (včetně výroby) provádím sám a jelikož zahrnuje mnoho času při modelování, nakupování, navrhování atd., probíhá celkem pomalu. Zbývá tak provést ještě několik návrhů, hlavně co se týká chlazení, krytování a elektrických prvků. Částečným výsledkem toho je i nekompletní model sestava. V modelu jsou totiž ty díly, které již reálně existují, či jsou naváděny do výroby. I přes tyto problémy však věřím, že tato přestavba bude dovedena do úspěšného konce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DOLEŽAL, Petr. *DESKRIPCE VERTIKÁLNÍCH FRÉZOVACÍCH STROJŮ*[online]. Brno, 2008 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5988. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR BLECHA, Ph.D.
2. MIKULOVÁ, Michaela. *FRÉZOVACÍ STROJE SOUČASNÉ PRODUKCE*[online]. Brno, 2009 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16447. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR BLECHA, Ph.D.
3. POLÁŠEK, Jaromír. *ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ STROJE: Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31_Cislicove_rizene_stroje.pdf
4. RUMÍŠEK, Pavel. *MECHANIZACE A AUTOMATIZACE* [online]. Brno, 2002 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/mechanizace_a_automatizace__ucebni_texty__rumisek.pdf. Sylaby - zkrácené učební texty. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
5. KELLER, Petr. *PROGRAMOVÁNÍ A ŘÍZENÍ CNC STROJŮ: Prezentace přednášek -2. část* [online]. 2005 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf. Technická univerzita v Liberci.
6. NOHÁL, Libor. *DESKRIPCE VŘETEN OBRÁBĚCÍCH STROJŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5798. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR BLECHA, Ph.D.
7. IMRICH, David. *KONSTRUKCE VŘETENE FRÉZOVACÍHO STROJE* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17329. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR BLECHA, Ph.D.
8. VODA, Pavel. *KONSTRUKCE FRÉZOVACÍHO VŘETENE* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40813. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. PETR BLECHA, Ph.D.

9. MicroLAB [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.twspindle.com/
10. Pulley Driven High speed spindle. *TAIWAN MACHINE TOOLS B2B* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.machinetooltw.com/eng/cp1431-104-Pulley%20Driven%20High%20speed%20spindle
11. Flange Type Built-in Spindle. *TAIWAN MACHINE TOOLS B2B* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.machinetooltw.com/eng/cp1431-103-Flange%20Type%20Built-in%20Spindle?1
12. Trapézové matice FCS - přírubová, samomazný plast. *EBECO* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.ebeco.cz/galerie/00010338-Trapezove_matice_FCS_-_prirubova,_samomazny_plast.pdf
13. Trapézové matice FXN - přírubová, bronz. *EBECO* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.ebeco.cz/galerie/00010329-Trapezove_matice_FXN_-_prirubova,_bronz.pdf
14. Trapézové matice MZP - válcová, ocel. *EBECO* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.ebeco.cz/galerie/00010318-Trapezove_matice_MZP_-_valcova,_ocel.pdf
15. Typy maticových jednotek. *KSK* [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/trapezove-srouby/typy-maticovych-jednotek/
16. Technologie zhotovení závitu. *KSK* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/kulickove-srouby/technologie-zhotoveni/
17. Accuracy of the Ball Screw. *THK* [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_a15_011.pdf
18. DYNAMIC 3000. *MODEL VISION* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.modelvision.cz/dynamic-3000.html
19. HŘEBENY S PŘÍMÝM OZUBENÍM. *RAVEO* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.raveo.cz/hrebeny-prime-ozubeni
20. HŘEBENY S ŠIKMÝM OZUBENÍM. *RAVEO* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.raveo.cz/hrebeny-sikme-ozubeni
21. Linear Positioning Actuator P3-12. *Airex* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.airex.com/products-technology/linear-positioning-actuator/P3-12/
22. FLEXISTEEL. *OPIS Engineering* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.opis.cz/spojky/flexsteel.html
23. Fanuc [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.fanuc.eu/cz/cs
24. Siemens *Sinumerik* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=3c76394997&ctxp=home
25. Heidenhain [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/

26. Mitsubishi *CNC systémy* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.mitsubishielectric.com/fa/products/cnt/cnc/items/cnc/
27. Fagor [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.fagorautomation.com/en/product/cnc-systems/
28. GSK [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.gskcnc.cz/
29. Gravos [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.gravos.cz/
30. CentroidCNC [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.centroidcnc.com/
31. LinuxCNC [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://linuxcnc.org/
32. Mach3. *Newfangled Solutions* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.machsupport.com/software/mach3/
33. ZWSoft [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: http://www.zwsoft.com/
34. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 9788073610517.
35. TURBO PRODUCT CATALOGUE. *SECO* [online]. 2006 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: https://www.secotools.com/CorpWeb/singapore/pdf/Turbo%20GB%20updated.pdf
36. Rotační nástroje. *SANDVIK Coromant* [online]. 2012 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/rotating/rot_e.pdf
37. Vzorce pro frézování. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx
38. Vzorce pro vrtání. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx
39. MP-Series™ Low-Inertia Motors. *Allen-Bradley* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/mp-pp001_-en-p.pdf
40. Global Drive 8200 vector: System Manual. *Lenze* [online]. 2012 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://download.lenze.com/TD/E82EV__8200%20vector%200.25-90kW__v3-0__EN.pdf
41. TYMA [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.tyma.cz/
42. CONTI SYNCHROBELT HTD Synchronous Drive Belts. *Tyma* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.tyma.cz/files/katalogy/contitech_htd_e.pdf
43. MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 9788026067801.

44. 1416/10.25.3,5.4. *Steinmeyer* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.steinmeyer.com/en/products/drive-technology/precision-ball-screws/single-nut-with-4-point-contact/1416-10-25-3-5-4_34233/pd/

45. SIMODRIVE 611 MASTERDRIVES MC, AC Servomotors 1FK6. *Siemens* [online]. Federal Republic of Germany, 2003 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/364/28593364/att_30487/v1/PFK6_0503_en.pdf

46. Progresivní mazací systémy. *SKF*[online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.skf.com/cz/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/progressive-lubrication-systems/index.html

47. Vícebodová automatická maznice řady LAGD 1000. *SKF*[online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.skf.com/cz/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/multi-point-automatic-lubricators/multipoint-automatic-lubricator-LAGD-1000-series/index.html

48. Gscreen Development / Docs. *LinuxCNCKnowledgeBase*[online]. 2013 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?Gscreen

49. 5I20 FPGA based PCI Anything I/O card. *MESA* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.mesanet.com/graphics/parallel/5i20colo.png

50. 7I42/7I42TA Breakout/FPGA protection card. *MESA* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.mesanet.com/graphics/parallel/7i42tacolo.png

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Popis
AC	Alternate Current (střídavý proud)
ATC	Automatic Tool Changer (Automatická Výměna Nástroje)
CNC	Computer Numerical Control (Počítačové Číslicové Řízení)
DC	Direct Current (stejnosměrný proud)
D x Š x H	Délka x Šířka x Hloubka
HMI	Human Machine Interface
KŠ	Kuličkový šroub
MPG	Manual Pulse Generator (Manuální generátor pulsů)
NC	Numerical Control (Číslicové Řízení)
OS	Operační Systém
PLC	Programmable Logic Controler (Programovatelný automat)
aj.	A jiné
apod.	A podobně
atd.	A tak dále
kr.	Krouticí (moment)
max.	Maximálně (nanejvýš)
např.	Například
popř.	Popřípadě
resp.	Respektive
souč.	Součinitel
str.	Strana
ver.	Verze
výst.	Výstupní

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
C_A	[kN]	Dynamická únosnost šroubu
D	[mm]	Průměr frézy
D_c	[mm]	Průměr vrtáku
D_{w2}	[mm]	Průměr hnané řemenice vřetene
F_A	[N]	Velikost působící síly (síla vyvinutá frézováním)
F_{cf}	[N]	Řezná síla
F_e	[N]	Testovací síla

Fex	[N]	Síla působící na píst, způsobena otáčením excentrického středu
$\mathbf{F_f}$	[N]	Síla posuvu
$\mathbf{F_p}$	[N]	Síla předpětí kuličkové matice
$\mathbf{F_{TV}}$	[N]	Třecí síla vznikající ve vedení v důsledku tíhy a vyosení působící síly
$\mathbf{F_u}$	[N]	Efektivní tahová síla
$\mathbf{F_v}$	[N]	Tahová síla v řemenu
$\mathbf{I_{out}}$	[A]	Jmenovitý výstupní proud frekvenčního měniče bez síťové tlumivky
$\mathbf{I_{sm}}$	[A]	Jmenovitý proud servomotoru vřetene
$\mathbf{J_1}$	[$kg \cdot m^2$]	Moment setrvačnosti malé řemenice osy Y
$\mathbf{J_2}$	[$kg \cdot m^2$]	Moment setrvačnosti velké řemenice osy Y
$\mathbf{J_m}$	[$kg \cdot m^2$]	Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot
$\mathbf{J_{mot}}$	[$kg \cdot m^2$]	Moment setrvačnosti rotoru motoru osy Y
$\mathbf{J_{rhm}}$	[$kg \cdot m^2$]	Celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel
$\mathbf{J_s}$	[$kg \cdot m^2$]	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu
L	[mm]	Délka lože (styčných ploch vedení)
$\mathbf{L_f}$	[mm]	Délka volné větve řemene
$\mathbf{L_w}$	[mm]	Délka řemenu vřetene
$\mathbf{M_c}$	[Nm]	Krouticí moment na nástroji
$\mathbf{M_F}$	[N]	Třecí moment vzniklý v důsledku třecí síly
$\mathbf{M_G}$	[Nm]	Zátěžový moment od tíhové síly
$\mathbf{M_{Gd}}$	[Nm]	Zátěžový moment od tíhové síly dynamický
$\mathbf{M_{GT}}$	[Nm]	Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot
$\mathbf{M_{KSM}}$	[Nm]	Ztrátový moment na kuličkovém šroubu
$\mathbf{M_{KSMd}}$	[Nm]	Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot
$\mathbf{M_L}$	[Nm]	Moment zátěže od třecích sil v ložisku
$\mathbf{M_m}$	[Nm]	Potřebný krouticí moment motoru vřetene
$\mathbf{M_{ma}}$	[Nm]	Výstupní krouticí moment motoru maznice
$\mathbf{M_{m1}}$	[Nm]	Minimální potřebný krouticí moment motoru osy Y
$\mathbf{M_{m2}}$	[Nm]	Minimální potřebný krouticí moment motoru osy Y
$\mathbf{M_{max}}$	[Nm]	Maximální krouticí moment servomotoru osy Y
$\mathbf{M_N}$	[Nm]	Jmenovitý krouticí moment servomotoru osy Y
$\mathbf{M_{sm}}$	[Nm]	Stálý krouticí moment servomotoru vřetene
$\mathbf{M_X}$	[Nm]	Krouticí moment servomotoru osy X
$\mathbf{M_Z}$	[Nm]	Krouticí moment servomotoru osy Z
$\mathbf{M_{zdrhm}}$	[Nm]	Celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru osy Y
P	[kW]	Výkon servomotoru osy Y
$\mathbf{P_0}$	[kW]	Výpočetní přenášený výkon
$\mathbf{P_c}$	[kW]	Potřebný výkon pro vrtání
$\mathbf{P_{fm}}$	[kW]	Výstupní výkon frekvenčního měniče
$\mathbf{P_N}$	[kW]	Výkon servomotoru osy Y při jmenovitých otáčkách

$\mathbf{P_R}$	[kW]	Výkon přenášený řemenem osy Y
$\mathbf{P_{sm}}$	[kW]	Výkon servomotoru vřetene
$\mathbf{P_v}$	[kW]	Výkon na vřeteni
$\mathbf{P_X}$	[kW]	Výkon servomotoru osy X
$\mathbf{P_Z}$	[kW]	Výkon servomotoru osy Z
$\mathbf{Q_m}$	[$l \cdot min^{-1}$]	Mazací průtok čerpadla z jedné výtlačné větve
$\mathbf{U_{out}}$	[V]	Výstupní napětí frekvenčního měniče bez síťové tlumivky
$\mathbf{U_{sm}}$	[V]	Jmenovité napětí servomotoru vřetene
$\mathbf{a}$	[mm]	Osová vzdálenost řemenic
$\mathbf{a_e}$	[mm]	Šířka frézování
$\mathbf{a_p}$	[mm]	Šířka záběru hlavního ostří nástroje
$\mathbf{a_r}$	[$m \cdot s^{-2}$]	Zvolené zrychlení příčníku (osy Y)
$\mathbf{a_v}$	[mm]	Vzdálenost působící síly od vedení
$\mathbf{b}$	[mm]	Šířka řemene
$\mathbf{c_0}$	[-]	Celkový výpočetní koeficient
$\mathbf{c_1}$	[-]	Koeficient zohledňující počet zubů v záběru
$\mathbf{c_2}$	[-]	Zátěžný koeficient
$\mathbf{c_3}$	[-]	Koeficient zohledňující převodový poměr
$\mathbf{c_4}$	[-]	Koeficient zohledňující dobu běhu
$\mathbf{c_5}$	[-]	Koeficient délky řemene
$\mathbf{d_1}$	[mm]	Průměr malé (hnací) řemenice osy Y
$\mathbf{d_{1d}}$	[mm]	Průměr díry v malé (hnací) řemenici osy Y
$\mathbf{d_{1X}}$	[mm]	Průměr hnací řemenice osy X
$\mathbf{d_{1Z}}$	[mm]	Průměr hnací řemenice osy Z
$\mathbf{d_2}$	[mm]	Průměr velké (hnané) řemenice osy Y
$\mathbf{d_{2d}}$	[mm]	Průměr díry ve velké (hnací) řemenici osy Y
$\mathbf{d_{2X}}$	[mm]	Průměr hnané řemenice osy X
$\mathbf{d_{2Z}}$	[mm]	Průměr hnané řemenice osy Z
$\mathbf{d_k}$	[mm]	Průměr šroubu osy Y
$\mathbf{d_{kX}}$	[mm]	Průměr šroubu osy X
$\mathbf{d_{kZ}}$	[mm]	Průměr šroubu osy Z
$\mathbf{d_L}$	[mm]	Průměr šroubu pro uložení v ložisku
$\mathbf{d_m}$	[mm]	Průměr válců čerpadla mazání
$\mathbf{d_s}$	[mm]	Střední průměr kuličkového šroubu osy Y
$\mathbf{d_{w1}}$	[mm]	Průměr hnací řemenice vřetene
$\mathbf{f_1}$	[-]	Součinitel kluzného tření vedení
$\mathbf{f_2}$	[-]	Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu a matici redukovaný na poloměr šroubu
$\mathbf{f_3}$	[-]	Ekvivalentní součinitel tření redukovaný na poloměr čepu
$\mathbf{f_{fm}}$	[Hz]	Výstupní frekvence frekvenčního měniče
$\mathbf{f_n}$	[mm]	Posuv na otáčku
$\mathbf{f_r}$	[$mm \cdot min^{-1}$]	Rychloposuv stolu v ose Y
$\mathbf{f_{sm}}$	[Hz]	Pracovní frekvence servomotoru vřetene

$\mathbf{f_X}$	[mm · min^{-1}]	Volený rychloposuv posuvové soustavy osy X
$\mathbf{f_{Xt}}$	[mm · min^{-1}]	Teoretický rychloposuv posuvové soustavy osy X
$\mathbf{f_z}$	[mm]	posuv na zub
$\mathbf{f_Z}$	[mm · min^{-1}]	Volený rychloposuv posuvové soustavy osy Z
$\mathbf{f_{Zt}}$	[mm · min^{-1}]	Teoretický rychloposuv posuvové soustavy osy Z
$\mathbf{g}$	[m · s^{-2}]	Tíhové zrychlení
$\mathbf{h_m}$	[mm]	průměrná tloušťka třísky
$\mathbf{i}$	[-]	Převodový poměr
$\mathbf{i_X}$	[-]	Převodový poměr vloženého převodu osy X
$\mathbf{i_Z}$	[-]	Převodový poměr vloženého převodu osy Z
$\mathbf{k_c}$	[N·mm^{-2}]	specifická řezná síla
$\mathbf{k_{c1}}$	[N·mm^{-2}]	Jednotková řezná síla
$\mathbf{l_k}$	[mm]	Délka šroubu osy Y
$\mathbf{l_m}$	[mm]	Hloubka vrtání
$\mathbf{m_c}$	[-]	Koeficient nárůstu síly
$\mathbf{m_p}$	[kg]	Hmotnost posouvaných hmot
$\mathbf{n}$	[min^{-1}]	otáčky nástroje
$\mathbf{n_{1X}}$	[min^{-1}]	Otáčky servomotoru osy X
$\mathbf{n_{1Z}}$	[min^{-1}]	Otáčky servomotoru osy Z
$\mathbf{n_2}$	[-]	Požadované otáčky vřetene
$\mathbf{n_k}$	[min^{-1}]	Maximální otáčky servomotoru
$\mathbf{n_m}$	[min^{-1}]	Otáčky motoru čerpadla mazání
$\mathbf{n_m}$	[min^{-1}]	Otáčky motoru vřetene
$\mathbf{n_{max}}$	[min^{-1}]	Maximální otáčky servomotoru
$\mathbf{n_N}$	[min^{-1}]	Jmenovité otáčky servomotoru osy Y
$\mathbf{n_v}$	[min^{-1}]	Otáčky vřetene
$\mathbf{n_{vc}}$	[min^{-1}]	Maximální otáčky vřetene
$\mathbf{s_k}$	[mm]	Stoupání kuličkového šroubu
$\mathbf{s_{kX}}$	[mm]	Stoupání šroubu osy X
$\mathbf{s_{kZ}}$	[mm]	Stoupání šroubu osy Z
$\mathbf{s_r}$	[mm]	Dráha rozjezdu stolu z klidu na rychloposuv (při předpokladu konstantního zrychlení)
$\mathbf{t}$	[mm]	Zubová rozteč
$\mathbf{t_e}$	[mm]	Průhyb řemene
$\mathbf{t_r}$	[s]	Doba rozjezdu stolu z klidu na rychloposuv (při předpokladu konstantního zrychlení) posuvové soustavy osy Y
$\mathbf{v}$	[min^{-1}]	Max. obvodová rychlost řemenic vloženého převodu osy Y
$\mathbf{v_c}$	[m·min^{-1}]	Řezná rychlost
$\mathbf{v_f}$	[m·min^{-1}]	Posuvová rychlost
$\mathbf{z}$	[-]	Počet zubů
$\mathbf{z_e}$	[-]	Počet zubů v záběru
$\mathbf{z_g}$	[-]	počet zubů hnací řemenice vřetene
$\mathbf{z_k}$	[-]	počet zubů hnané řemenice vřetene

z_m	[mm]	Pracovní zdvih čerpadla
z_w	[-]	Počet zubů řemene vřetene
α	[°]	Úhel sklonu vedení
β	[°]	Úhel opásání malé řemenice
γ_0	[°]	Úhel čela
γ_0	[°]	Úhel čela
ε_x	[$rad \cdot s^{-2}$]	Úhlové zrychlení motoru osy Y
ε_y	[$rad \cdot s^{-2}$]	Úhlové zrychlení šroubu osy Y
η_1	[%]	Účinnost vloženého (řemenového) převodu
η_c	[%]	celková účinnost
η_{cy}	[-]	Celková posuvové soustavy Y
η_L	[%]	Účinnost ložiska
η_L	[%]	Účinnost ložiska
$\eta_{ř}$	[%]	Účinnost řemenového převodu
$\eta_{š}$	[%]	Účinnost šroubu
η_v	[%]	Účinnost vedení
κ_r	[°]	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
κ_r	[°]	Nástrojový úhel nastavení ostří
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	Hustota oceli

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výkres sestavy: CNC frézka (151811 – BP – 01)