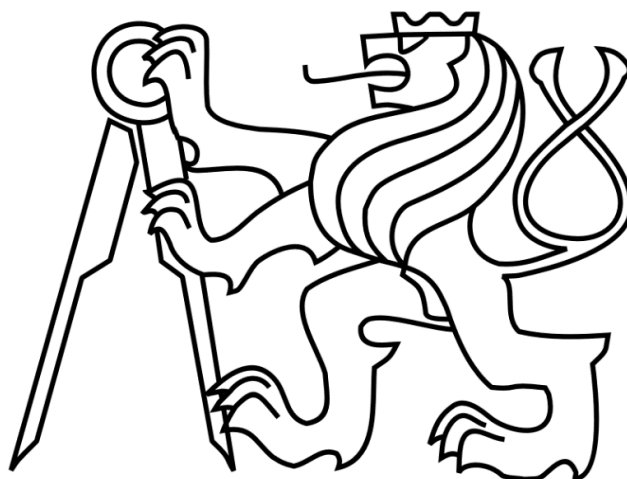


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

**Zvyšování produktivity práce na vertikálních obráběcích centrech s využitím
přídavných os**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kadlec** Jméno: **Aleš** Osobní číslo: **485360**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zvyšování produktivity práce na vertikálních obráběcích centrech s využitím přídavných os

Název bakalářské práce anglicky:

Productivity enhancement of vertical machining centers with the use of additional axes

Pokyny pro vypracování:

Hlavním cílem práce je návrh přídavné rotační osy za účelem zvýšení produktivity práce při malosériové výrobě dílců na vertikálním centru Mikron VCE 600. Na tomto stroji budou navrženy různé koncepce řešení přídavné osy. Uvažuje se obrábění z více stran obrobku. Dále bude proveden výběr finální varianty, která bude detailně zpracována. Obsahem práce budou návrhové výpočty a zhodnocení předpokládaných nákladů projektu; Osnova práce: 1. Úvod, 2. Rešerše otočné sklopných a otočných stolů OS včetně jejich komponent. 3. Stanovení požadavků na přídavnou rotační osu. 4. Návrh koncepcí a výběr finální varianty. 5. Vývoj vybrané varianty, návrhové výpočty. 6. Vyhodnocení přínosů navrženého řešení; Rozsah grafické části: výkres hlavní sestavy a dva výrobní výkresy. Rozsah textové části: 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

[1] HOUŠA, Jaromír a Bedřich RUDOLF. Výrobní stroje. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00993-9.; [2] Stejskal, V., Valášek, M.: Kinematics and Dynamics of Machinery, Marcel Dekker, New York 1996; [3] Souček, P.: Servomechanismy ve výrobních strojích, monografie, vydavatelství ČVUT 2004, ISBN 80-01-02902-6; [4] Souček, P., Bubák, A.: Vybrané statě z kmitání v pohonech výrobních strojů, skriptum ČVUT 2008, ISBN 978-80-01-04048-5; [5] KRIVÝ, POSPÍCHAL : Fundamentals of design I, English texts; [6] KRIVÝ : Fundamentals of design II - Rules of Interchangeability, English texts; SLANEC, K. Konstruování - Geometrická přesnost výrobků, díl 1 až 3. ČVUT Praha (Czech).; [7] Švec, V.: Části a mechanismy strojů - Mechanické převody. ČVUT, Praha, 2003; [8] Katalogy výrobců použitých komponent;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

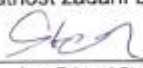
Ing. Eduard Stach, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

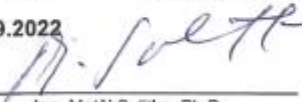
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

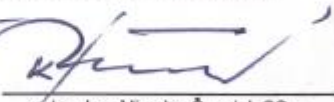
Datum zadání bakalářské práce: **22.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

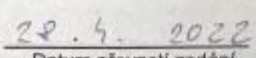

Ing. Eduard Stach, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

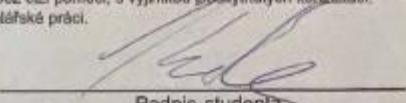

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Eduardu Stachovi, Ph.D. za odborné rady při vytváření mé závěrečné práce.

Anotace

Autor:	Aleš Kadlec
Název BP:	Zvyšování produktivity práce na vertikálních obráběcích centrech s využitím přídavných os
Rozsah práce:	70 str., 79 obr., 12 tab.
Akademický rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Eduard Stach, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Zařízení určené pro zvýšení produktivity na tříosém vertikálním centru
Klíčová slova:	Zvýšení produktivity, konstrukce, polohovací zařízení
Anotace:	<p>Bakalářská práce se zabývá návrhem přídavných os pro obráběcí stroje za účelem zvýšení produktivity výroby. Rešeršní část práce je zaměřena na otočné stoly, naklápěcí otočné stoly a použité komponenty. Ve vlastním řešení jsou stanoveny požadavky na přesnost polohování a síly z obráběcích operací pro polohovací zařízení. Možné konstrukční varianty v provedení jedné nebo dvou rotačních os vycházejí ze stanovených požadavků. U vybrané varianty je uvedena technologie výroby dílu vyžadujícího obrábění z více stran. Tato technologie výroby je ekonomicky zhodnocena a porovnána se současnou technologií výroby. Práce obsahuje kontrolní výpočty, montážní výkres, dva výrobní výkresy a technologické postupy.</p>

Annotation

Author:	Aleš Kadlec
Title of Diploma dissertation:	Productivity enhancement of vertical machining centers with the use of additional axes
Extent:	70 p., 79 fig., 12 tab.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines
Supervisor:	Ing. Eduard Stach, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Tilting rotary table for CNC machine tool
Key words:	Productivity enhancement, design, positioning device
Annotation:	<p>The presented bachelor thesis deals with the design of additional axes for machine tools in order to increase production productivity. The research part is focused on rotary tables, tilting rotary tables and used components. The requirements for positioning accuracy and forces from machining operations for the positioning device are determined in the solution. Possible variety in the design of one or two rotary axes are based on the set requirements. For the selected variety, the production technology of a part requiring machining from several sides is presented. This production technology has been economically evaluated and compared with the current production technology. The work includes control calculations, assembly drawing, two production drawing and technological processes.</p>

Obsah

Přehled použitých veličin a jednotek	8
Přehled zkratk.....	11
1. Úvod	12
2. Cíl práce	12
3. Stav řešené problematiky	13
3.1. Typy obráběcích strojů	13
3.1.1. Obráběcí centra a soustružnické stroje na rotační součásti	14
3.1.2. Obráběcí centra na nerotační součásti	15
3.2. Multifunkční obráběcí stroje	17
3.3. Otočně sklopné stoly CNC obráběcích strojů	18
3.4. Výrobci otočných a otočně sklopných stolů s příklady jejich produktů	18
3.5. Konstrukce otočně sklopných stolů	20
3.6. Komponenty otočně sklopných stolů	22
3.6.1. Rám otočně sklopného stolu	23
3.6.2. Ložiska rotačních os	23
3.6.3. Převodové mechanismy otočně sklopných stolů	24
3.6.4. Pohony otočně sklopných stolů	27
3.6.5. Odměřování natočení.....	28
3.6.6. Brždění a fixace rotačních os.....	30
3.7. Závěr rešerše	31
4. Zadání	32
4.1. Stanovení požadavků na rotační osu.....	33
4.1.1. Přesnost polohování rotační osy stolu	33
4.2. Stanovení řezných sil působících na rotační osu	34
4.2.1. Operace dokončovací frézování	34
4.2.2. Operace hrubovací frézování	35
4.2.3. Operace vrtání.....	35
4.2.4. Zhodnocení působících sil	36
5. Návrhy variant polohovacího zařízení.....	37
5.1. 1. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Y ..	37
5.2. 2. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Z ..	38
5.3. 3. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem v ose B.....	39
5.4. 4. varianta - provedení jedné rotační osy	40



5.5.	5. varianta - provedení jedné rotační osy	41
5.6.	Výběr varianty	42
6.	Vlastní konstrukce přídatné osy.....	43
6.1.	Vybrané komponenty dodavatelů	43
6.1.1.	Šneková převodovka	44
6.1.2.	Servomotor	45
6.1.3.	Bezvlková spojka	45
6.1.4.	Axiálně – radiální ložisko	45
6.1.5.	Pneumatická brzda	46
7.	Ustavení zařízení a přeprava	47
8.	Implementace zařízení do stroje Mikron VCE 600 Pro	47
9.	Technologie výroby a ekonomické zhodnocení	48
	Technologie výroby	48
9.1.1.	Technologie výroby dílce bez přídatné osy.....	49
9.1.2.	Technologie výroby dílce s přídatnou osou	49
9.2.	Ekonomické zhodnocení.....	51
9.2.1.	Náklady na výrobu jednoho kusu bez přídatné osy.....	51
9.2.2.	Náklady na výrobu jednoho kusu s přídatnou osou	51
9.2.3.	Ušetřené náklady	52
9.2.4.	Náklady na pořízení přídatné osy a návratnost investice	53
9.3.	Výpočtová část	54
9.3.1.	Výpočet zrychlení rotační osy	54
9.3.2.	Porovnání hodnoty času s výrobcem	55
9.3.3.	Kontrola jmenovitého kroutícího momentu servomotoru	56
9.3.4.	Kontrola brzdícího momentu při vrtání a hrubovacím frézování	56
9.3.5.	Silové poměry šnekového převodu	57
9.3.6.	Kontrolní výpočet axiálně-radiálního ložiska	58
9.3.7.	Kontrola spojky.....	60
10.	Závěr.....	61
Seznamy	62
	Seznam použité literatury	62
	Seznam obrázků	67
	Seznam tabulek	69
	Seznam příloh.....	70

Přehled použitých veličin a jednotek

a	$[mm]$	Osová vzdálenost šnekového kola a šnekové hřídele
a_k	$[1]$	Výpočtová konstanta pro válečková ložiska
a_{p_d}	$[mm]$	Hloubka třísky při dokončování
a_{p_h}	$[mm]$	Hloubka třísky při hrubování
b_d	$[mm]$	Šířka třísky při dokončování
C_a	$[N]$	Dynamická únosnost ložiska v axiálním směru
C_r	$[N]$	Dynamická únosnost ložiska v radiálním směru
C_{0a}	$[N]$	Statická únosnost ložiska v axiálním směru
C_{0r}	$[N]$	Statická únosnost ložiska v radiálním směru
CC_{po}	$[Kč]$	Celková cena přídavné osy
D	$[mm]$	Vnější průměr ložiska
d	$[mm]$	Vnitřní průměr ložiska
D_o	$[mm]$	Obráběný průměr obrobku
D_{n_d}	$[mm]$	Vnější průměr dokončovací frézy
D_{n_h}	$[mm]$	Průměr hrubovací frézy
d_1	$[mm]$	Průměr roztečné kružnice šnekového hřídele
d_2	$[mm]$	Průměr roztečné kružnice šnekového kola
F_{o_d}	$[N]$	Obvodová síla od operace dokončovací frézování
F_{o_h}	$[N]$	Obvodová síla od operace hrubovací frézování
F_{ob}	$[N]$	Síla od tíhy obrobku, svěráku, stolu, rotačního tělesa a šnekového kola
F_{rad_max}	$[N]$	Celková síla zatěžující ložisko v radiálním směru
F_v	$[N]$	Síla od vrtání
F_{t1}	$[N]$	Tečná síla od ozubení u šnekového hřídele
F_{t2}	$[N]$	Tečná síla od ozubení u šnekového kola
F_{a1}	$[N]$	Axiální síla od ozubení u šnekové hřídele
F_{a2}	$[N]$	Axiální síla od ozubení u šnekového kola
F_{r1}	$[N]$	Radiální síla od ozubení u šnekového hřídele
F_{r2}	$[N]$	Radiální síla od ozubení u šnekového kola
f_{ot}	$[mm]$	Posuv na otáčku
f_z	$[mm]$	Posuv na zub
HRS	$\left[\frac{Kč}{hod.}\right]$	Hodinová režijní sazba
HRS_1	$\left[\frac{Kč}{hod.}\right]$	Hodinová režijní sazba pásové pil



HRS_2	$\left[\frac{Kč}{hod.}\right]$	Hodinová režijní sazba frézovacího centra MikronVCE 600 Pro
HRS_3	$\left[\frac{Kč}{hod.}\right]$	Hodinová režijní sazba univerzální frézky EMCO FB 5
I_1	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti hřídele servomotoru
I_2	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti spojky
I_3	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti hřídele šnekové převodovky
I_4	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti šnekového kola
I_5	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti rotačního tělesa
I_6	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti axiálně- radiálního ložiska
I_7	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti sestavy stolu, svěráku a obrobku
I_{red}	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti redukováný na hřídel servomotoru
I_{in}	$[kg \cdot mm^2]$	Součet momentů setrvačnosti součástí před šnekovou převodovkou
I_{out}	$[kg \cdot mm^2]$	Součet momentů setrvačnosti součástí za šnekovou převodovkou
i	[1]	Převodový poměr šnekové převodovky
k_F	[1]	Bezpečnost při návrhu maximální síly
k_{t_d}	[1]	Součinitel korekce frézovaného průřezu při dokončování
k_{t_h}	[1]	Součinitel korekce frézovaného průřezu při hrubování
L_{10}	$[n^{-1}]$	Základní výpočtová trvanlivost ložiska
L_a	[hod]	Trvanlivost ložiska v axiálním směru
L_r	[hod]	Trvanlivost ložiska v radiálním směru
L_d	[hod]	Doporučená trvanlivost ložiska
M_{celk}	$[N \cdot m]$	Celkový odporový kroutící moment
M_t	$[N \cdot m]$	Třecí moment v axiálně- radiálním ložisku
M_k	$[N \cdot m]$	Jmenovitý kroutící moment servomotoru
M_{k1}	$[N \cdot m]$	Potřebný kroutící moment servomotoru při frézování dokončování
M_{kr}	$[N \cdot m]$	Rozběhový kroutící moment servomotoru
M_{bmax}	$[N \cdot m]$	Maximální brzdňý moment
M_{kb}	$[N \cdot m]$	Brzdňý moment vyvinutý pneumatickou brzdou
M_{ks}	$[N \cdot m]$	Brzdňý moment šnekové převodovky při nulové úhlové rychlosti
M_{max_d}	$[N \cdot m]$	Maximální kroutící moment od operace dokončovací frézování
M_{max_h}	$[N \cdot m]$	Maximální kroutící moment od operace hrubovací frézování
M_{max_v}	$[N \cdot m]$	Maximální kroutící moment od operace vrtání
M_{s_max}	$[N \cdot m]$	Maximální přenášený kroutící moment spojky
M_{m_max}	$[N \cdot m]$	Maximální kroutící moment servomotoru
NS_0	[Kč]	Náklady na výrobu jednoho kusu bez přídavné osy



NS_1	[Kč]	Náklady na výrobu jednoho kusu s přídatnou osou
NS_2	[Kč]	Náklady na výrobu dvou kusů s přídatnou osou
NI	[den]	Doba návratu investice
n_{max}	[min^{-1}]	Maximální otáčky ložiska
q_n	[1]	Návrhový součinitel řezného odporu
R_m	[$\frac{N}{mm^2}$]	Mez pevnosti v tahu
S_{t_d}	[mm^2]	Maximální průřez třísky při dokončování
S_{0r}	[1]	Statická bezpečnost v radiálním směru
S_{0a}	[1]	Statická bezpečnost v axiálním směru
S_{z_d}	[mm]	Posuv na zub při dokončování
S_{z_h}	[mm]	Posuv na zub při hrubování
t_{xx}	[min]	Čas operace
$t_{xx.xx}$	[min]	Čas úseku
$t_{xx.xx.xx}$	[min]	Čas úkonu
t_b	[min]	Celkový čas výroby jednoho kusu bez přídatné osy
t_p	[min]	Celkový čas výroby jednoho kusu s přídatnou osou
t_1	[s]	Čas zrychlení z nulové úhlové rychlosti na maximální rychlost
t_2	[s]	Čas konstantní úhlové rychlosti rotační osy
t_3	[s]	Čas brždění z maximální úhlové rychlosti na nulovou rychlost
t_{90}	[s]	Čas nutný k otočení rotační osy o 90°
v_c	[$\frac{m}{min}$]	Řezná rychlost
v_k	[$m \cdot s^{-1}$]	Kluzná rychlost
z_d	[1]	Počet zubů dokončovací frézy
z_h	[1]	Počet zubů hrubovací frézy
α	[s^{-2}]	Úhlové zrychlení osy
γ	[°]	Úhel stoupání šroubovice šnekové hřídele
ΔNS_{18}	[Kč]	Ušetřené výrobní náklady s výrobní kapacitou 18 kusů za den
ΔNS	[Kč]	Ušetřené výrobní náklady při použití přídatné osy
$\Delta NS_{\%}$	[%]	Procentuální výše ušetřených nákladů
φ_1	[°]	Úhel, který urazí bod po kružnici za čas t_1 při zrychlení α
φ_3	[°]	Úhel, který urazí bod po kružnici za čas t_3 při zpomalování α
φ_2	[°]	Úhel, který urazí bod po kružnici za čas t_2 při kons. rychlosti
φ'	[°]	Třecí úhel
ω_{in}	[s^{-1}]	Úhlová rychlost hřídele šnekové převodovky

ω_{out}	$[s^{-1}]$	Úhlová rychlost šnekového kola
ω_{max}	$[s^{-1}]$	Maximální úhlová rychlost šnekového kola

Přehled zkratk

CNC	Computer numerical control
HRS	Hodinová režijní sazba
VBD	Vyměnitelné břitové destičky

1. Úvod

Součástí každého výrobku ve strojní výrobě je výrobní proces, který definuje přeměnu vstupu na výstup. Pro výrobní proces je charakteristický výrobní čas, který určuje dobu potřebnou pro zhotovení daného výrobku.

Výrobní čas se poté promítá do produktivity, která definuje, jakou hodnotu jsme schopni vytvořit za jednotku času. [1]

Výrobní čas se skládá z času technologického a manipulačního. Technologický čas závisí na použité technologii a výrobní strategii, zatímco manipulační čas zahrnuje přepravní operace, technologické manipulace, nakládání a skladování. [2]

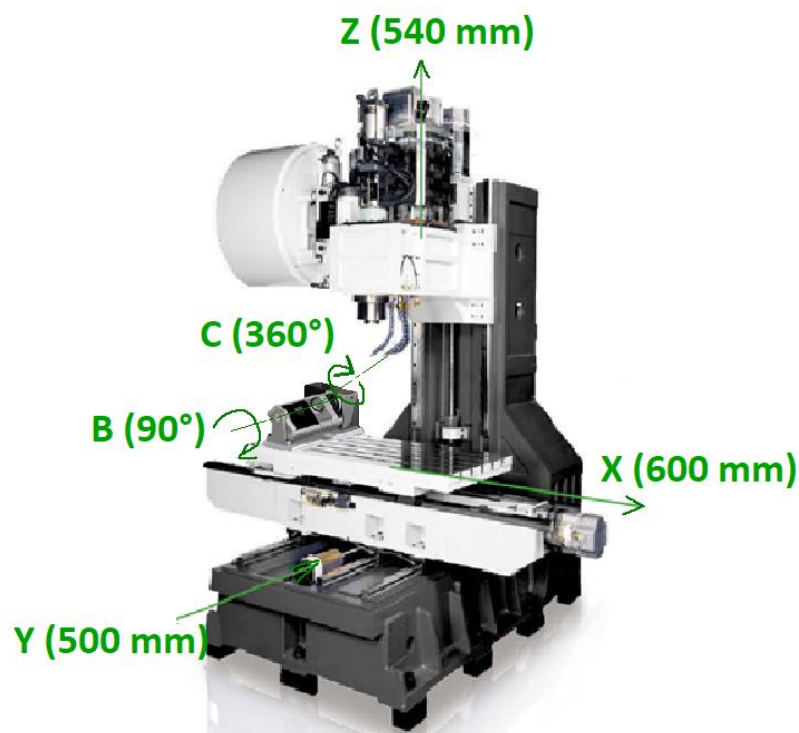
Při obrábění dílců může být manipulační činností upínání dílců, které negativně prodlužuje celkový výrobní čas a zhoršuje produktivitu. K redukci manipulačního času mohou posloužit dnes již běžné 5osé obráběcí stroje, které dokážou obrobek opracovat z více stran. Ne vždy je ale možné těchto strojů využít, např. pokud 5osý stroj není k dispozici nebo je vyčerpána jeho kapacita. Obráběcí 3osé stroje většinou umožňují opracovat obrobek pouze z jedné strany, což bohužel při následném přeupínání vede ke zhoršení přesnosti a delším výrobním časům. Alternativním způsobem může být vybavení 3osého stroje polohovacím zařízením, které může výrobu určitých dílů urychlit a zároveň zpřesnit, pokud není obrobek vyjmut z upínacího zařízení.

2. Cíl práce

Cílem práce je navrhnout způsob zvýšení produktivity práce na tříosé vertikální frézce Mikron VCE 600 Pro (Obr. 2.1). K naplnění tohoto cíle je možné použít polohovací zařízení, které umožní rychleji opracovat obrobky vyžadující obrábění z více stran. Dále bude technologicky možné opracovávat rotační dílce a rozšířit tak technologické možnosti.

Osnova postupu bakalářské práce je následující:

1. Rešerše zaměřená na popis tématu; typy obráběcích strojů; otočné stoly; otočné sklopné stoly; komponenty; závěr/shrnutí rešerše
2. Stanovení požadavků na rotační osu, přesnost polohování; stanovení řezných sil
3. Koncepční návrhy polohovacího zařízení
4. Výběr konkrétní varianty
5. Vlastní konstrukce
6. Výrobní technologie
7. Ekonomické zhodnocení
8. Výpočtová část
9. Zpracování výkresové dokumentace



Obr. 2.1 - 3osá vertikální frézka Mikron VCE 600 Pro [3]

3. Stav řešené problematiky

3.1. Typy obráběcích strojů

Obráběcí stroj je výrobní stroj, který umožňuje dát obrobku žádaný geometrický tvar a jakost povrchu oddělováním materiálu ve formě třísek řezným nástrojem.

Computer Numerical Control (CNC) je počítačem řízený stroj obsahující automatický cyklus výroby a nahrazuje strojní posuvy konané obsluhou stroje. [6]

CNC obráběcí stroje dnes zaujímají majoritní postavení mezi obráběcími stroji. Obrábění jako součást průmyslu zaujímá velice důležitý segment trhu. Průmysl v ČR v roce 2018 zaujímal 28,7% HDP. [7]

Podle způsobu obrábění se obráběcí stroje rozdělují na:

- Soustruhy – hrotové, čelní, svislé, revolverové
- Frézky – konzolové, stolové, rovinné, speciální
- Vrtačky – stolní, sloupové, stojanové
- Brusky – hrotové, bezhroté, na díry, rovinné, stolní
- Vodorovné vyvrtávačky „horizontky“
- Hoblovky – jednostojanové, dvoustojanové
- Obrážky – vodorovné, svislé
- Stroje pro výrobu ozubení, závitů a vaček

Podle tvaru obrobku lze obráběcí stroje rozdělit na:

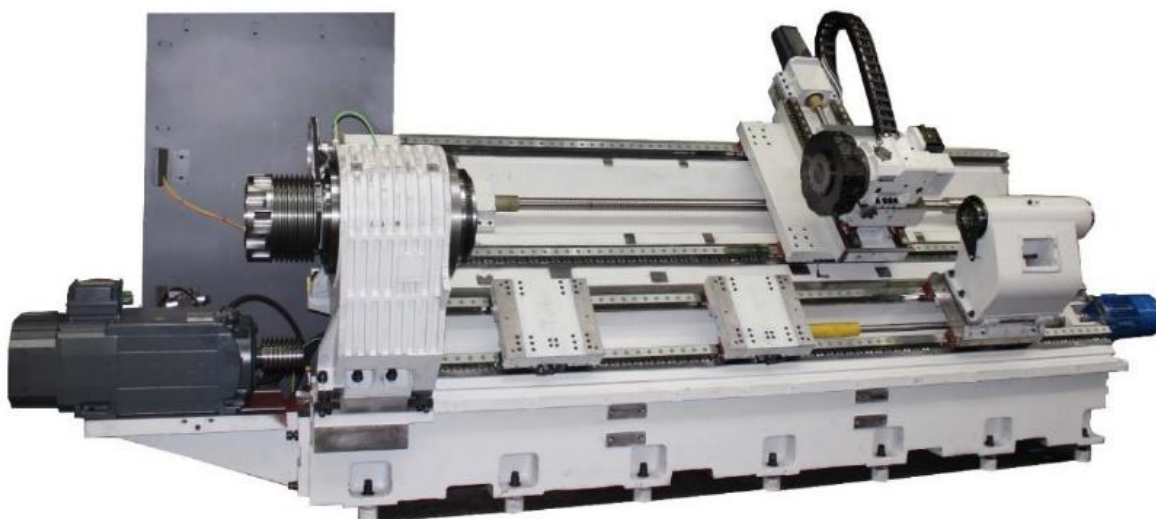
- Obráběcí centra a soustružnické stroje na rotační součásti
- Obráběcí centra na nerotační součásti
- Multifunkční obráběcí centra

3.1.1. Obráběcí centra a soustružnické stroje na rotační součásti

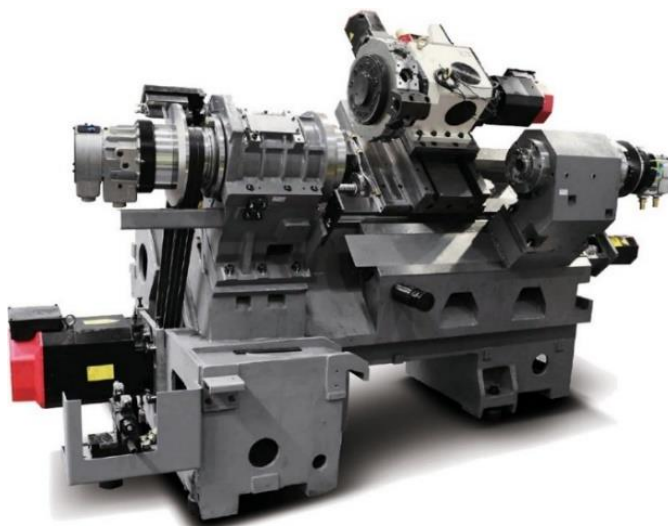
Soustruhy jsou stroje, kde hlavní rotační pohyb koná obrobek. Nástroj se umísťuje na jinou, pohyblivou část stroje. Obráběcí centra postavená na koncepci soustruhu jsou řešením pro obrábění válcových součástí.

Tyto stroje jsou vybaveny nástrojovou hlavou, která umožňuje použít nepoháněné i poháněné nástroje a obrobit součást zcela jinou operací, než je soustružení. Výsledkem je stroj schopný opracovat obrobky vyžadující mimoosé vrtání, frézování drážek, kapes či ozubení. Nejčastější typ provedení těchto strojů je s vodorovnou osou vřeten (Obr. 3.1). Obráběcí centra na bázi soustruhu využívají pro práci osu C a pro maximální využitelnost i osu Y (Obr. 3.2). Tuhost, produktivitu a někdy i přesnost práce na stroji zlepšuje dvouvřetenové provedení.

Důležitým prvkem těchto strojů je lože stroje. Tento konstrukčně náročný díl strojů musí splňovat požadavky, jako jsou dostatečně tuhá struktura pro dosažení dostatečné statické i dynamické tuhosti, dobrý odvod třísek, nízká hmotnost a vyrobitelnost. Lože soustružnického centra vede pomocí kluzného nebo valivého vedení suport soustruhu, do kterého se upínají nástroje. Tomuto konstrukčnímu uzlu je věnována patřičná pozornost, protože musí spolehlivě přenést síly vzniklé obráběním. [6]



Obr. 3.1 – CNC soustruh AVIAturn 63M [8]



Obr. 3.2 – CNC soustruh DMC řady DL Y doplněný o osu Y [9]

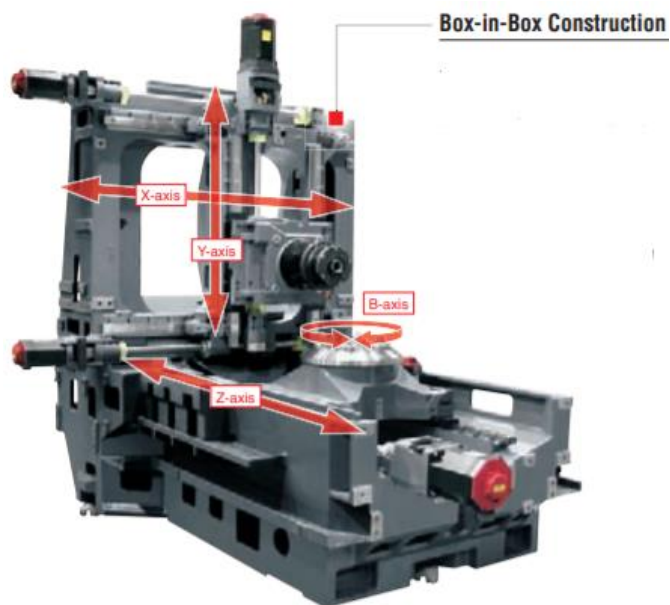
3.1.2. Obráběcí centra na nerotační součásti

Jde o nejrozšířenější stroje využívané pro obrábění nerotačního tvaru. Stroje jsou primárně určeny pro základní operaci frézování. Lze na nich vrtat, vyvrtávat a obrábět plochy rovinného tvaru ale i zcela obecné plochy, kde se často s výhodou uplatní 4osé a 5osé stroje. Standardně jsou vřetena těchto strojů vybavena řízenými otáčkami a lze na nich vyrábět závity. Podle polohy osy vřetene se tyto stroje dělí na horizontální a vertikální. Výhodou obráběcích center s vodorovnou osou (Obr. 3.4) je vyšší tuhost vřetene v porovnání se svislou osou a lepší odvod třísek. Stroje se svislou osou (Obr. 3.5) disponují efektivním 5osým obráběním, lépe se na nich obrábí deskovité i ploché obrobky a umožňují lépe upínat součásti, protože vnější síly působí proti dosedací ploše. Samostatnou kategorií jsou portálové stroje používané pro obrábění složitých součástí, kde převládá délka nad ostatními rozměry z více stran. V provedení spodní gantry (Obr. 3.6), kdy se pohybuje celý portál nebo provedení horní gantry, kde se pohybuje příčník s vřeteníkem. [6]

Obráběcí centra pro nerotační součásti se dále dělí na konstrukce:

- S pevným stojanem
- S pohyblivým stojanem
- S výsuvným vřeteníkem
- Portálové

Speciální je konstrukce s pevným stojanem, tzv. Box-in-Box provedení s vodorovným vřetenem (Obr. 3.3). Vývoj této konstrukce byl motivován tím, že pohyblivé části konstrukce jsou polohovány v jejich těžišti. Na rozdíl od konstrukcí s pohyblivým stojanem, kde nejsou pohyblivé části stroje polohovány v těžišti a dochází tak k nežádoucím vibracím, jejichž důsledkem je horší povrch obrobku. [10]



Obr. 3.3 – stroj DMG Mori NH4000 DCG [8]



Obr. 3.4 – stroj TOSHULIN WRFT 130 [9]



Obr. 3.5 – stroj Quaser MF 630U [10]



Obr. 3.6 – stroj MRM Machinery UNIPORT4000 [11]

3.2. Multifunkční obráběcí stroje

Multifunkční obráběcí stroje umí provádět více obráběcích operací. V největší míře je zastoupeno frézování, soustružení, vrtání a vyvrtávání. Na rozdíl od obráběcích center rotačních a nerotačních obrobků už nerozlišujeme dominantní operace.

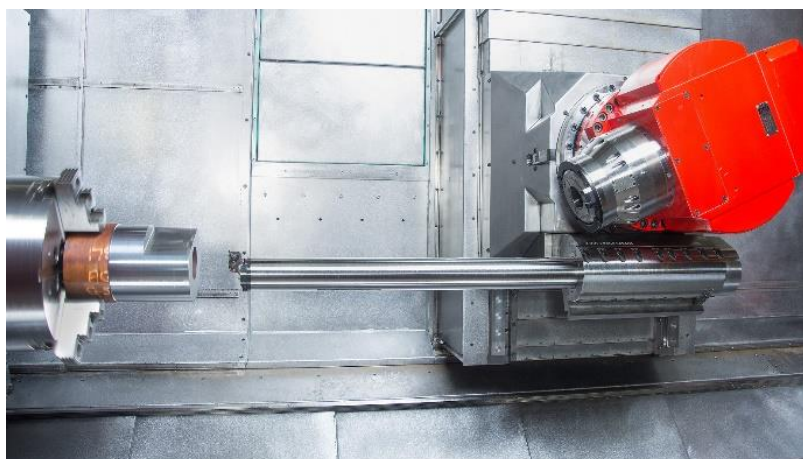
V drtivé většině jde o kombinaci soustružení a frézování. Pro frézování a soustružení jsou v jednom multifunkčním stroji instalované podobné výkony, čímž zaniká rozdíl těchto operací.

Jako příklad je na Obr. 3.7 ukázáno obrábění ozubeného věnce na multifunkčním obráběcím centru s instalovaným otočným stolem. Díky vysokým otáčkám otočného stolu a pevně uchycenému noži ve vřetení lze na stroji plnohodnotně soustružit. Mezi další operace se může zařadit obrábění hlubokých děr (Obr. 3.8) a uplatňuje se i opracování laserem.

Výhodou multifunkčních obráběcích strojů je zkrácení času potřebného pro opracování obrobku. Jeden multifunkční stroj je schopný nahradit více strojů, šetří se tak zástavbové rozměry a finanční prostředky na pořízení druhého stroje. Tyto stroje mají v dnešní době široké zastoupení hlavně v malosériové a kusové výrobě. [12]



Obr. 3.7 – Obrábění ozubeného věnce na multifunkčním stroji [13]

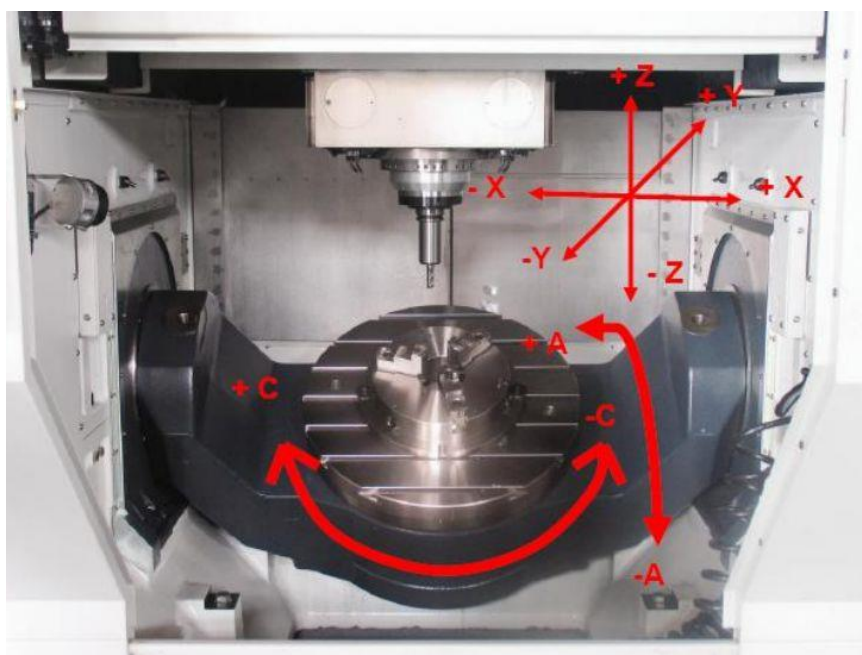


Obr. 3.8 – Multifunkční obráběcí centrum MAS MULTICUT 630 [14]

3.3. Otočně sklopné stoly CNC obráběcích strojů

Otočně sklopné stoly mohou být ve strojích zabudované již z výroby, ale své uplatnění nacházejí také jako samostatně prodejné produkty. Otočně sklopné stoly jsou polohovány ve dvou osách. Tyto osy nesou označení podle rotace kolem jednotlivých os. Pokud je kartézský souřadnicový systém stroje označen X,Y,Z, jsou rotační osy označeny písmeny A,B,C (Obr. 3.9). Tímto způsobem je koncipována většina 4osých a 5osých CNC strojů menších rozměrů.

Použití otočně sklopného stolu nabízí možnosti víceosého obrábění a zvyšuje produktivitu i přesnost. Zároveň jsou ale narušeny statické a dynamické vlastnosti stroje, což má negativní vliv na kvalitu obrobeneho povrchu. Současně se i zmenšuje obráběcí prostor a nelze tak opracovávat velké obrobky. [15]



Obr. 3.9 – Označení os CNC stroje [16]

3.4. Výrobci otočných a otočně sklopných stolů s příklady jejich produktů

Na trhu je velké množství firem produkujících otočně sklopné stoly. Mezi zmiňované lze uvést firmu Lehmann, Nikken či Fibro. Tyto firmy nabízejí široký výběr otočných a otočně sklopných stolů, které jsou nejčastěji koncipovány s osami řízenými řídicím systémem stroje. Při průzkumu trhu byl poptán otočný stůl značky Lehmann (Obr. 3.10) umožňující implementovat přídatnou osu do prostoru vertikální tříosé frézky MIKRON VCE 600 Pro.

Přídavná osa značky Fibro je otevřená nezakrytovaná konstrukce oproti značce Lehmann a je již v základu vybavena stolem s T-drážkami. Tento stůl je možné používat ve vodorovné i vertikální poloze jak je zobrazené na Obr. 3.11.



Obr. 3.10 – Přídavný stůl Lehmann EA-520 [5]












Obr. 3.11 – Přídavný stůl FIBROPLAN NC 1.03 [17]

Značka Nikken ve svém portfoliu nabízí otočně sklopný stůl (Obr. 3.12), jehož konstrukce umožňuje manipulovat v rozsahu 0-90° v jedné rotační ose. Druhá rotační osa je vybavena servomotorem připojeným k řídicímu systému stroje.

Tchajwanská značka TJR nabízí otočně sklopný stůl, který je vybaven ručním naklápěním (Obr. 3.13) a navíc je tento stůl je vybaven hydraulickým bržděním naklápěcí osy.

Všechny tyto stoly disponují servomotorem a převodem pomocí šnekového převodu. V Tab. 1 jsou zobrazeny parametry vybraných otočných a otočně sklopných stolů.

Tab. 1 – Porovnání parametrů otočných a otočně sklopných stolů

		Lehmann EA-520	Fibro FIBROPLAN NC 1.03	Nikken NST300	TJR MTHR(s) 255
Max.točivý moment pohonné jednotky [Nm]		440	240	288	550
Max. zatěžovací moment v zabrzděné poloze [Nm]		2 000	2 000	903	700
Max. zatěžování klopným moment [Nm]		3 900	2 000	2 010	850
Max. axiální síla v horizontální poloze [N]		100 000	35 000	31 860	16 000
Max. moment setrvačnosti obrobku [kgm ²]		8	9	3,37	2
Dovolené zatížení stolu ve vodorovné poloze [kg]		800	1 000	300	250
Dovolené zatížení stolu v poloze 90° [kg]		400	300	100	100
Max. otáčky řízené osy [1/ot.]		50	12,5	11,1	33,3
Přesnost polohování [± arc sec]		2	15	20	15



Obr. 3.12 – Otočně sklopný stůl Nikken NST 300 [18]



Obr. 3.13 – Otočně sklopný stůl TJR MTHR(s) 255 [19]

3.5. Konstrukce otočně sklopných stolů

Výrobci otočně sklopných stolů nejvíce využívají montáž pomocí šroubů na pracovní stůl obráběcího stroje. Uložení sklopné části stolu v nosné části otočně sklopného stolu (Obr. 3.14) se používá oboustranné, jednostranné a kombinované. Každý tento typ uložení má své výhody i nevýhody.

Oboustranné uložení (Obr. 3.9) disponuje tuhým uložením otočného stolu a má tak vyšší únosnost.

Jednostranné uložení (Obr. 3.14) otočných stolů už nezajišťuje tak dobrou únosnost, nicméně jsou tyto typy stolů používány kvůli lepšímu přístupu nástroje k obrobku.

U kombinovaných uložení (Obr. 3.15) je snahou zvýšit únosnost stolu podepřením volného konce stolu. Lze tak docílit větší únosnosti a zlepšit statickou tuhost stroje.

Tyto známé konstrukce otočně sklopných stolů se používají pro obrábění malých a středně velkých obrobků. Rotační osa C je u těchto stolů plně polohovatelná o 360°. Rotační osa A bývá zpravidla omezena, např. u značky Lehmann na 230°.

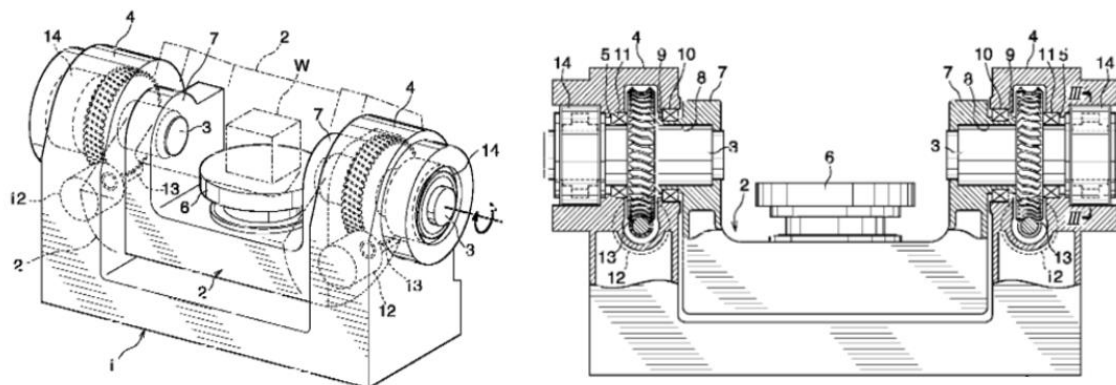


Obr. 3.14 - Otočně sklopný stůl značky Lehmann [5]



Obr. 3.15 - Kombinované uložení značky TANSHING [20]

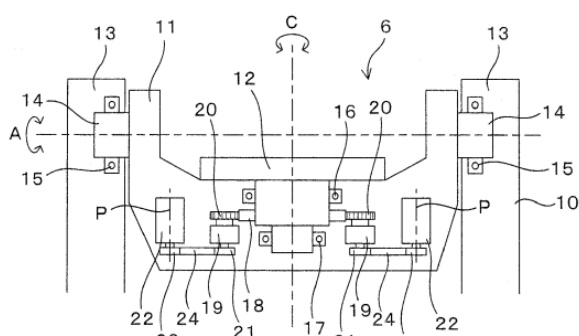
Další typy konstrukcí zobrazené na Obr. 3.16 až Obr. 3.19 představují méně běžné typy otočně sklopných stolů. Na Obr. 3.16 je zobrazen otočně sklopný stůl s kolébkovou konstrukcí. Rotace osy A je zde lépe znázorněna v řezu na pravé straně, kde polohu natočení zajišťují dvě šnekové převodovky. Čepy (pozice 3) jsou pevně spojeny se šnekovým kolem (pozice 13) a se sklopnou částí stolu (pozice 2). Ložiska (pozice 10 a 11) vymezují polohu mezi nosnou částí konstrukce (pozice 1) a sklopnou částí stolu. [21]



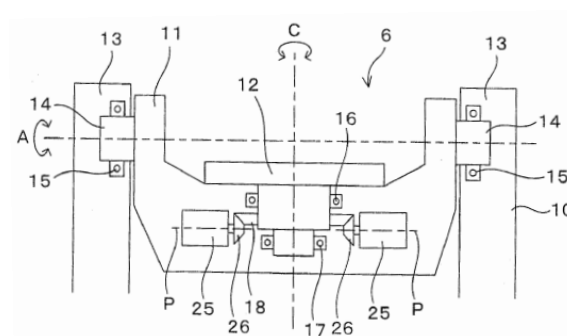
Obr. 3.16 – Kolébková konstrukce [21]

Na Obr. 3.17 a Obr. 3.18 je zobrazena kolébková konstrukce a náhonová soustava osy C v tělese pracovního stolu. Rotační stůl je v obou případech uložen do dvojice ložisek (pozice 16 a 17), které zachytávají síly od ozubení a od řezného procesu. Ložisko (pozice 16) je proporcčně větší kvůli přenosu větších zatížení.

Na Obr. 3.17 pohání osu C dvojice servomotorů (označeno P) přes dvojici řemenových převodů (pozice č. 24) a dvojici pastorků (pozice 20). Pastorky zabírají se společným ozubeným kolem (pozice 18), které je součástí rotačního stolu (pozice 12).



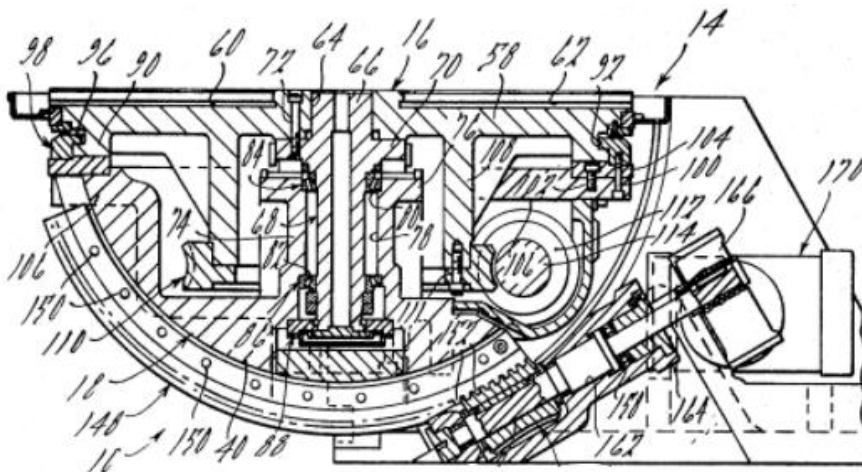
Obr. 3.17 – Náhon osy C pomocí dvojice řemenových převodů a ozubení [22]



Obr. 3.18 – Náhon osy C pomocí kuželového soukolí [22]

Pro pohon osy C může být použito kuželové soukolí (Obr. 3.18). Dvojice servomotorů (pozice 25) má na výstupní hřídeli nasazena kuželová ozubená kola (pozice 26), která zabírají se společným kuželovým kolem (pozice 18).

Jiná konstrukce otočně sklopného stolu je zobrazena na Obr. 3.19. Tato konstrukce byla navržena s cílem zvýšit tuhost při polohování a obrábění těžších obrobků. Vyšší tuhosti bylo u této konstrukce dosaženo eliminací soustav čepů, která slouží k polohování osy A u výše zmíněných stolů. U této konstrukce byly pro polohování osy A použity zakřivené plochy (pozice č. 40). Pozice 110 je šnekové kolo, které je pevně spojeno otočným stolem a zabírá se šnekovým hřídelem (pozice č. 114). [23]



Obr. 3.19 – Řez osou otočně sklopného stolu [23]

3.6. Komponenty otočně sklopných stolů

Otočně sklopný stůl jako přídatné zařízení obráběcího stroje se skládá z několika nezbytných komponent.

- Rám (nosná soustava)
- Ložiska
- Pohon rotačních os
- Převodový mechanismus
- Odměřovací zařízení
- Brzdící mechanismus
- Těsnění
- Přenos médií
- Krytování
- Technologické příslušenství jako např. svěrák

Při vývoji rotačních os obráběcího stroje je nutné zohledňovat velké množství požadavků. Jedná se především o dosažení stanovených technologických možností, které má otočně sklopný stůl zvládnout. Důležitým parametrem bude zdvih jednotlivých os obráběcího stroje a velikost upínací plochy stroje. Tyto parametry nás budou limitovat ve výběru komponent a návrhu velikosti otočného stolu.

3.6.1. Rám otočně sklopného stolu

Rám otočného stolu musí být dostatečně tuhý, aby odolával silám vzniklých od obrábění. Při návrhu je nutné dbát na efektivní využití materiálu a nezvyšovat zbytečně hmotnost. Konstrukce rámu probíhá s ohledem na způsob výroby, nejčastěji je využita technologie slévání a svařování s následným obrobením funkčních ploch, popř. vyrobit z jednotlivých, přesně obrobených součástí, které se nakonec pomocí šroubů smontují. Při sériové výrobě se rámy strojů odlévají, ale při prototypové výrobě by to bylo velmi nákladné.

Při návrhu pohonu bude nutné se zabývat hmotností pohyblivých součástí otočného stolu. Čím těžší a hmotnější budou pohyblivé dílce, tím se bude muset navrhovat výkonnější a zpravidla rozměrnější pohon. Hmotnosti pohyblivých dílců jsou redukovány, aby se dosáhlo lepších dynamických vlastností. Touto redukcí se zabývá topologická optimalizace, která nám umožňuje přidávat materiál do míst, kde je kvůli vysokým napětím vyžadován, a naopak jej ubírat z míst, kde není zapotřebí. [6]

3.6.2. Ložiska rotačních os

U obráběcích strojů se dříve používala kluzná ložiska. Jejich nespornou výhodou byla schopnost dobře tlumit vibrace. U těchto ložisek vzniká trhavý pohyb kvůli vysokému tření za klidu. Kluzná ložiska jsou stále používána u konvenčních strojů, kde posuvy stroje vykonává obsluha. U CNC strojů se tyto ložiska nepoužívají. [24]

Pro přesné polohování rotačních os se u CNC strojů používají valivá ložiska. Pro zajištění vysoké únosnosti se často volí válečková ložiska, při potřebě vyšších otáček zase ložiska kuličková. Existuje velké množství výrobců ložisek, kteří je nejčastěji dělí do tříd podle přesnosti. Pro obráběcí stroje, obzvláště pro vřetena, se používají ložiska nejvyšších tříd přesnosti. Známymi firmami jsou SKF, FAG, ZKL, THK, či Schaeffler. [6]

Většinou se kvůli nedostatku místa u otočných stolů používá jedno kombinované ložisko umožňující zachytávat radiální síly, axiální síly a klopné momenty (Obr. 3.20 a Obr. 3.21). Firma THK nabízí křížové válečkové ložisko (Obr. 3.20) s využitím pro otočné desky obráběcích center, otoče průmyslových robotů a rotační jednotky manipulátorů. V ložisku je mezi válečky vložen rozpěrný díl, který zamezuje kontaktu válečků a jejich vzájemnému tření, což by vedlo k nepříznivému ohřevu ložiska. [25]

Typ ložiska, které nabízí firma FAG (Obr. 3.21) využívají často výrobci obráběcích strojů ve svých otočných stolech. Tato ložiska se montují do rámu pomocí šroubů bez lisování. Při vyšších otáčkách otočného stolu je potřeba zajistit dostatečný přívod oleje do ložiska.

Pro nižší otáčky se nejčastěji používá plastické mazivo, které je do místa styku dopraveno vrtanými kanály, popř. hadičkami. Typ mazacího média a způsob mazání je udáván výrobcem. [26]



Obr. 3.20 – Křížové válečkové ložisko firmy THK [25]



Obr. 3.21 – Válečkové ložisko řady YRTC firmy FAG [28]

3.6.3. Převodové mechanismy otočně sklopných stolů

Převodové mechanismy otočných stolů slouží k redukci otáček a k nárustu točivého momentu. Pro polohování stolu si vystačíme s velice nízkými otáčkami. Většina servomotorů má pracovní otáčky kolem 3000 ot./min. Převodem do pomala tuto hodnotu můžeme snížit. Převodový poměr jako bezrozměrná veličina udává kolikrát se sníží nebo zvýší otáčky nebo točivý moment na výstupu.

Výběr převodového mechanismu u přídatných os bude zásadně ovlivňovat velikost vůle, přesnost polohování a dosažitelný točivý moment. Je dobré znát výhody jednotlivých způsobů převodových mechanismů a využít tak naplno jejich potenciál.



Obr. 3.22 – Pohon polohovacího stolu svařovací linky [29]



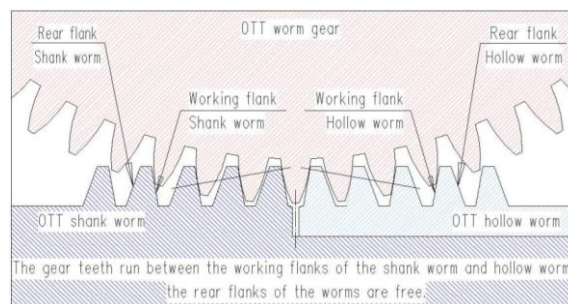
Obr. 3.23 – Globoidní tvar šnekového kola a válcový tvar šnekové hřídele [30]

Jako převodový mechanismus se u otočných stolů může použít řemenový převod (Obr. 3.22). Ten se často používá i u vřeten obráběcích strojů. Pro přesné polohování stolu je nutné vymezit vůli a používat synchronní – ozubené řemeny. Používaným profilem s minimální vůlí je křivkový profil zubu, který nahradil starší profil HTD s půlkulatým profilem zubu. U klínových a jiných typů řemenů by mohlo dojít k nežádoucímu prokluzu a ztratila by se tak informace o skutečné poloze natočení. Při menším průměru hnací řemenice, než je průměr hnané řemenice dochází k nárůstu točivého momentu. Nejčastěji jsme limitováni největším možným průměrem hnané řemenice, která by mohla zasahovat do ostatních komponent. Dále jsme limitováni u menší řemenice minimálním úhlem opásání. Čím je tento úhel menší, tím méně zubů je v záběru a dochází k nadměrnému opotřebení. Tento problém lze minimalizovat použitím napínací kladky. [29]

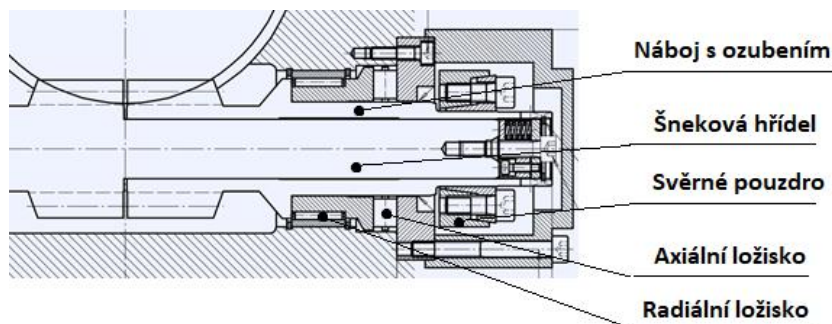
Šnekový převod patří mezi velice rozšířené mechanismy. Používají jej výrobci otočných stolů jako je Lehmann, Nikken nebo Fibro. Šnekový převod přenáší točivý moment mezi mimoběžnými hřídeli, které mezi sebou svírají nejčastěji 90°. Používá se globoidní tvar šneku a šnekového kola a tím je dosaženo nejlepších záběrových parametrů. Zároveň je ale výroba globoidního šneku náročná a od toho se odvíjí i cena. Nejvíce se používá kompromisní varianta převodu s globoidním kolem a válcovým šnekem (Obr. 3.23). [31]

U šnekových převodů se může vymezení vůle řešit systémem Master&Slave. Tímto způsobem se vymezuje vůle v ozubení za pomoci dvou servomotorů. Servomotory vyvinutým točivým momentem předepnou šnekové kolo a odstraní tak vůli mezi zuby. Pomocí elektrického proudu můžeme pak velikost předpětí regulovat podle aktuální obráběcí operace. [32]

Dalším možným způsobem vymezení vůle šnekového převodu je použití OTT děleného šneku. Točivý moment se přenáší na šnekové kolo šnekovou hřídelí, která je osazena ozubením pouze do první poloviny. Druhá polovina je broušená jako hřídel bez ozubení a je na ní nasazen náboj s ozubením, který dotváří druhou polovinu šnekového hřídele. Otáčením ozubeného náboje proti šnekovému kolu vymizí vůle v ozubení a hřídel s nábojem se pomocí svěrného pouzdra zafixuje. Tímto způsobem se vymezí vůle mezi zuby šnekového kola a šnekovou hřídelí (Obr. 3.24 a Obr. 3.25). [33]



Obr. 3.24 – Dělený šnek firmy OTT [33]

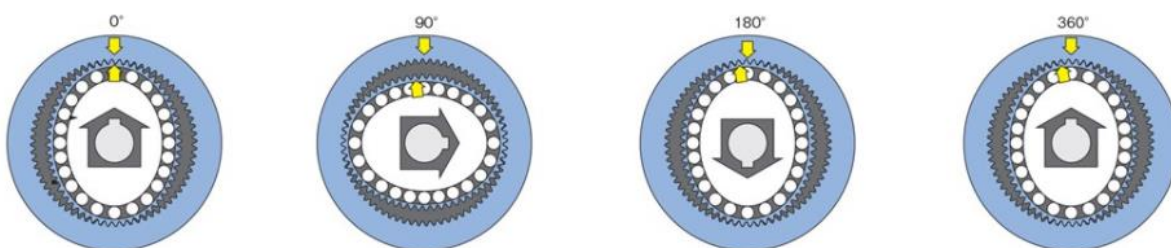


Obr. 3.25 – Vymezení vůle děleným šnekem firmy OTT [33]

Alternativním způsobem je využití harmonické převodovky. Harmonické převodovky mají široké uplatnění, ale nejčastěji se používají v aplikacích s nedostatkem prostoru a potřebou vysokého kroutícího momentu. Tyto převodovky disponují vysokou přesností polohování. U této převodovky je v záběru více zubů, což minimalizuje vůle a zvyšuje tuhost mechanismu. Harmonická převodovka se skládá z generátoru vln, pružného kola a oběžného kola (Obr. 3.26). Podstatou přenosu výkonu je využití elastické deformace u pružného kola, které se díky své radiální poddajnosti přizpůsobí tvaru generátoru vln. [34]



Obr. 3.26 – Generátor vln spolu s pružným a oběžným kolem [34]

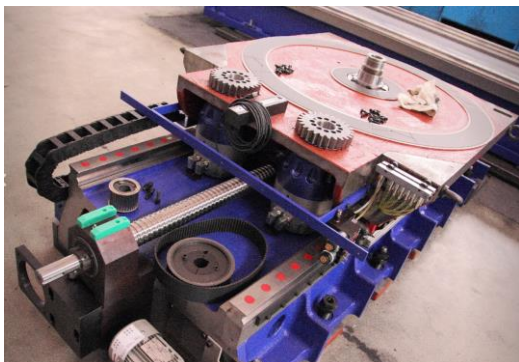


Obr. 3.27 – Princip funkce harmonické převodovky [34]

Na Obr. 3.27 je znázorněn princip funkce harmonické převodovky. Výstupní otáčky pocházejí z pružného kola a generátor vln je spojen s pohonem. Při otočení generátoru vln o jednu otáčku se pružné kolo otočí v opačném směru o jeden zub vůči oběžnému kolu.

Nevýhodou tohoto mechanismu může být vyšší cena oproti ostatním typům převodů a drahé opravy v případě poškození.

Dalším možným způsobem, jak zvýšit točivý moment na výstupu je použití ozubeného převodu – pastorku (Obr. 3.28) a ozubeného věnce, který je smontován s pracovním stolem. Tyto typy převodů se používají u otočných stolů velkých rozměrů a slouží jako příslušenství těžkých strojů jako jsou např. horizontální vyvrtávačky, které polohují s obrobky o hmotnosti až 80 tun. [31]



Obr. 3.28 – Dvojice pastorků na otočném stole RT05 [35]



Obr. 3.29 – Použití prstencových motorů na stroji MCU 360 od firmy MAS [36]

Prstencové motory (Obr. 3.31) často používají výrobci obráběcích strojů pro pohon naklápěcích a rotačních os (Obr. 3.29). Jde o typ pohonu, který lze použít bez převodového mechanismu, neboť disponuje vysokým kroutícím momentem.

3.6.4. Pohony otočně sklopných stolů

Pro pohybové osy obráběcích strojů se používají synchronní servomotory. Rotor je u těchto motorů poháněn synchronně prostřednictvím permanentních magnetů. Na rozdíl od běžných elektromotorů dokážou nastavit přesnou polohu natočení osy výstupní hřídele. Zařízením pro odečet úhlů natočení a otáček je fotoelektrický snímač (enkodér), který se nachází nejčastěji na zadní straně servomotoru. Ložiska servomotorů bývají opatřena tukovou náplní, která umožní bezúdržbový provoz po celou dobu jejich provozu. [37] [38]



Obr. 3.30 – Servomotor značky Mavilor [39]



Obr. 3.31 – Prstencový motor značky HIWIN [40]

Potřeba zvýšení krouticího momentu vede u servomotorů (Obr. 3.30) k použití převodového mechanismu. Pokud potřebujeme dodržet zástavbové rozměry, je nutné s tím počítat. Servomotory jsou zdrojem tepla, které se se snažíme odvádět, aby teplotní dilatace co nejméně ovlivňovala geometrické parametry otočně sklopného stolu. Pro odvod tepla se používá vodního chlazení, nebo se servomotor umísťuje co nejdále od konstrukce.

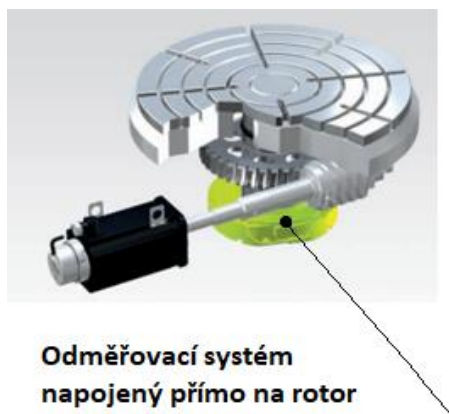
Další variantou pohonu může být již zmíněný prstencový motor (Obr. 3.31). Tyto motory vynikají svojí vysokou produktivitou, lepší přesností a vyšší dynamikou. Prstencový motor přímo pohání zátěž, což je velká výhoda oproti servomotorům používaných s převodovým mechanismem, kde dochází k nepřesnostem. Dále díky absenci převodového ústrojí jsou tyto motory účinnější a zpravidla bezúdržbové. [41]

Při provozu těchto typů motorů vzniká teplo, které je nutné z konstrukce odvádět. Vzhledem k absenci převodového mechanismu musí být prstencovému motoru dodat vysoký proud a napětí, aby vyvinul dostatečně vysoký krouticí moment. Další nevýhodou jsou vyšší nároky na regulaci přímého pohonu a vyšší rázová poddajnost.

3.6.5. Odměřování natočení

Odměřování poloh at' již u lineárních os nebo rotačních os lze rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé odměřování (Obr. 3.32) je charakteristické tím, že se odměřuje přímo z rotačního členu, který je pevně spojen se zátěží (s obrobkem).

Nepřímé odměřování (Obr. 3.33) je charakteristické použitím snímače zabudovaného v servomotoru. Mezi servomotorem a obrobkem je často dlouhý řetězec převodů, který může ovlivňovat skutečnou polohu natočení. Natočení hřídele servomotoru tedy nemusí odpovídat požadovanému natočení obrobku a dochází tak k chybám. Pokud nemůžeme zaručit přesné polohování obrobku, je přímé odměřování nezbytný komponent otočně sklopného stolu. [42]



Obr. 3.32 – Přímé odměřování polohy [42]



Obr. 3.33 – Nepřímé odměřování polohy [42]

Podle způsobu vyhodnocení měřeného signálu lze snímače dělit na inkrementální a absolutní.

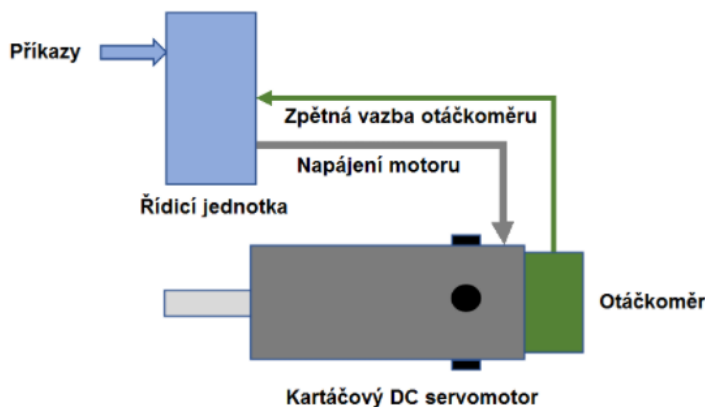
Inkrementální snímač zjišťuje o kolik úhlových, popř. délkových jednotek, se změnila poloha objektu. Tento snímač pracuje v rozsahu jedné otáčky a při odpojení napájení ztrácí svoji polohu, kterou je nutné zjistit při dalším zapojení do sítě.

Absolutní snímač umí pracovat s počtem otáček a je schopen říct polohu v rámci jedné otáčky. Toho je dosaženo měřeným signálem, který je v každé poloze natočení jiný a je k němu přiřazena konkrétní hodnota natočení. Při odpojení napájení a opětovném spuštění je známa poloha natočení narozdíl od inkrementálního snímače. [43] [42]

Pro přímé odměřování polohy slouží snímače, které mohou fungovat na různých principech. U CNC obráběcích strojů se používá princip optický, induktivní, magnetický i laserový.

Optické odměřování, označované také jako fotoelektrické se často používá právě při řízení os obráběcího stroje. Pro odměřování rotačních os se používá kotouč s průřezy. Přes průřezy v kotouči prochází světelný paprsek, který se přerušuje právě při poloze, kdy v kotouči není průřez. V okamžiku přerušování světelného paprsku se vygeneruje impuls. Citlivost senzoru je vyšší, čím více je průřezů po obvodu kotouče. [44]

U servomotorů se zabudovaným snímačem je výhodou, že může být instalován přímo výrobcem. Takto používané servomotory využívají princip zpětnovazebního řízení (Obr. 3.34). Jednoduchým průmyslovým servomotorem může být stejnosměrný motor se snímačem. Snímač zabudovaný v servomotoru může být např. otáčkoměr. Otáčkoměr vysílá výstupní napětí, které je úměrné rychlosti otáčení hřídele rotoru do řídicího systému stroje. Řídicí systém na základě obdrženého napětí a příkazu (např. z programu) vyhodnotí potřebné napětí a proud, který je vysílán pomocí napájení zpět do servomotoru. [45]



Obr. 3.34 – Zpětnovazební řízení servomotoru [45]

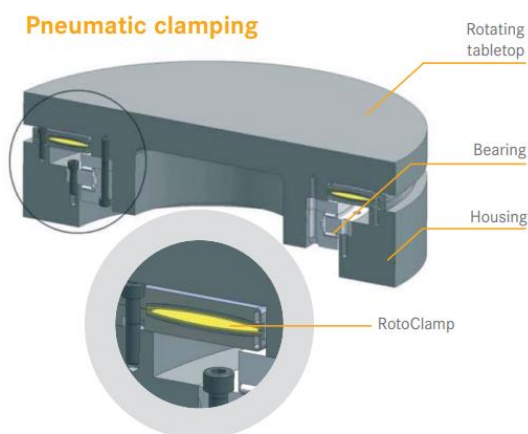
3.6.6. Brždění a fixace rotačních os

Při obrábění mohou vznikat síly, na které pohon příslušné osy nestačí. Při použití brzdy se zafixuje příslušná osa v konkrétní poloze a stroj může vykonávat řezný proces s vyšším výkonem. Při této fixaci už však nelze souvisle obrábět.

Brždění os lze z hlediska použitého média rozdělit na hydraulické a pneumatické. Tyto brzdy dokážou zpevnit osu jak v axiálním, tak radiálním směru.

Pneumatické brzdy zafixují hřídel otočné osy pomocí stlačeného vzduchu. Používají se pro trvalou fixaci hřídele, kdy je např. stlačeným vzduchem stlačena síla pružiny a hřídel se stane odlehčeným. [46]

Pneumatická brzda značky HEMA (Obr. 3.35) využívá pružinové membrány, na Obr. 3.35 je zobrazeno jako RotoClamp. Vzduch o tlaku 4 až 6 bar pružinovou membránu „odlepí“ od radiální a axiální plochy rotačního stolu, ten je na Obr. 3.35 zobrazen jako Rotating tabletop. Tento způsob se používá i v bezpečnostních aplikacích, kdy hrozí ztráta tlaku. [47]



Obr. 3.35 – Pneumatická brzda značky HEMA [47]



Obr. 3.36 – Hydraulická brzda značky KOSTYRKA [48]

Hydraulické brzdy používají ke stlačení hydraulický olej, z tohoto hlediska u nich lze vygenerovat větší brzdný moment. U hydraulických brzd značky KOSTYRKA stlačený hydraulický olej vyplní mezeru mezi pevným pouzdrem (Obr. 3.36 - zobrazeno jako 4) a deformovatelným bronzovým pláštěm (Obr. 3.36 - zobrazeno jako 5). Vyšší tlak oleje znemožní protáčení hřídele a vyvodí tak brzdný moment. [48]

3.7. Závěr rešerše

V rešerši byla představena nejpoužívanější ložiska obráběcích strojů. Konkrétně u otočných stolů bývá používáno speciální ložisko umožňující přenášet radiální i axiální síly. Tento typ ložiska je vhodné použít do malých zástavbových prostor, kde by nestačil prostor pro uložení dvou a více ložisek. Důležitým aspektem je také mazání ložisek. Typ mazání každý výrobce ložisek předepisuje nejčastěji podle rozsahu otáček. Vzhledem k malému zástavbovému prostoru stroje bude vhodné použít válečkové axiálně – radiální ložisko, které má nízké rozměry na výšku a dokáže zachytit síly od obrábění a klopné momenty.

V dnešní době se pro polohování rotačních os ve strojích používají prstencové motory, které disponují vysokou přesností a dynamikou. Díky přímému napojení na pracovní stůl zde nevznikají nepřesnosti způsobené při použití převodových mechanismů. U torzních motorů vzniká při provozu teplo, které je nutno odvádět. Použití prstencového motoru limitují nároky na chladicí okruh a pravděpodobně bude nutné použít samostatný výkonový modul v podobě měniče napětí.

Na otočných stolech se používá přímé odměřování přímo na rotačním členu, který je napevno spojen např. s pracovním stolem. Tím jsme schopni zajistit velice přesné polohování. Nevýhodou však je nutnost většího zástavbového prostoru a vyšší cena odměřovacího systému.

U převodových mechanismů se musí brát ohled na možnou vůli v mechanismu. Použitím řemenu s ozubením nebo šnekového převodu s vymezenou vůlí se dá tomuto problému předejít. U většiny výrobců je stále používaným typem převodu šneková převodovka v kombinaci se servomotorem, který disponuje vlastním odměřovacím systémem. Tento typ pohonu bude použit při návrhu variant.

4. Zadání

V následující kapitole budou definovány požadavky na polohovací zařízení.

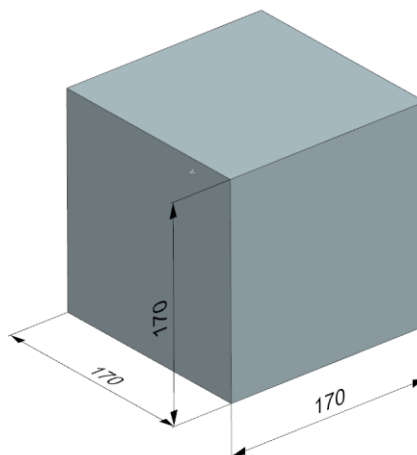
Zadáním je navrhnout polohovací zařízení, která umožní 3osé vertikální frézce MIKRON VCE 600 Pro (Obr. 4.1) zvýšit produktivitu.

Požadavky na polohovací zařízení jsou následující:

- Zredukování výrobního a manipulačního času
- Možnost opracování dílců z více stran
- Možnost obrábění rotačních součástí
- Obrábění dílců s hmotností do 40 kg a maximálními rozměry obrobku zobrazenými na Obr. 4.2



Obr. 4.1 - 3osá vertikální frézka Mikron VCE 600 Pro s přídavnou 4. osou [3]



Obr. 4.2 – Maximální rozměry obrobku

4.1. Stanovení požadavků na rotační osu

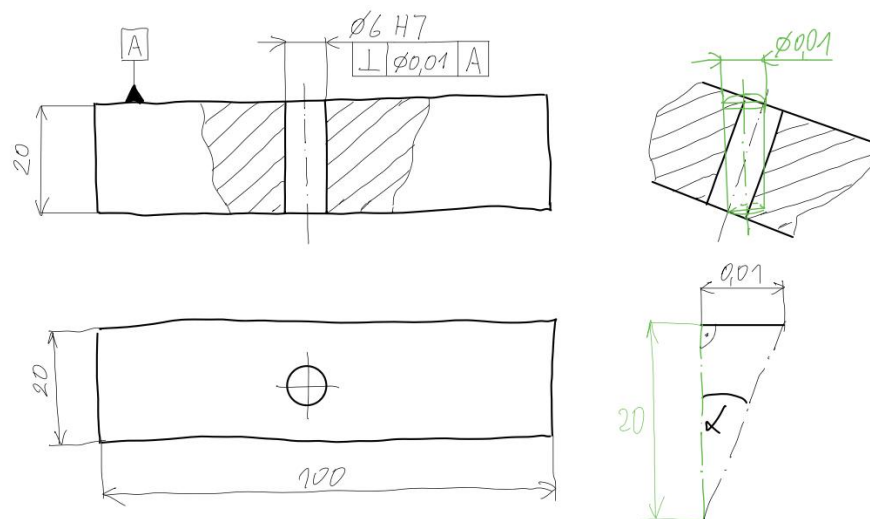
4.1.1. Přesnost polohování rotační osy stolu

V této kapitole bude stanovena přesnost polohování rotační osy stolu.

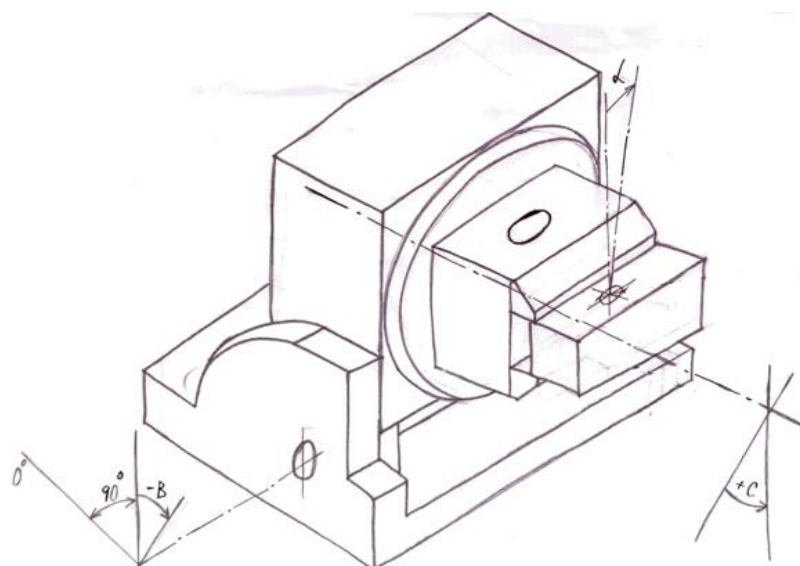
K výpočtu přesnosti polohování rotační osy C (Obr. 4.4) poslouží dílec vyžadující obrobení přesného otvoru (Obr. 4.3). Dodržení kolmosti osy díry k základně A vyžaduje polohování osy C v patřičné přesnosti.

Podle délky vrtaného otvoru a velikosti tolerančního pole pak přesnost polohování vychází:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0,01}{20} \right) = 0,029 = 0^{\circ}1'43'' \quad (4.1)$$



Obr. 4.3 – Obrobek s tolerovanými otvory



Obr. 4.4 – Rotační osa C

4.2.**4.2. Stanovení řezných sil působících na rotační osu**

V následující kapitole budou vypočítány řezné síly a momenty působící od procesu obrábění.

Pro stanovení řezných sil bude vybrána konstrukční ocel C45 (12 050), která má dle (4.2) mez pevnosti:

$$R_m = 540 \text{ Mpa} \quad (4.2)$$

Návrhový součinitel řezného odporu q_n volím dle (4.3):

$$q_n = (4 - 5) \cdot R_m = 5 \cdot 540 = 2700 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

4.2.1. Operace dokončovací frézování

Maximální průřez třísky S_{t_d} vychází z hloubky třísky a_{p_d} a šířky třísky b_d . Volím $a_{p_d} = 1 \text{ mm}$ a $b_d = 10 \text{ mm}$, pak průřez třísky vychází:

$$S_{t_d} = a_{p_d} \cdot b_d = 1 \cdot 10 = 10 \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

Součinitel korekce frézovaného průřezu k_{t_d} , který udává velikost korekce při návrhu řezné síly při operaci dokončování je určen vztahem:

$$k_{t_d} = \frac{s_{z_d} \cdot z_d}{\pi \cdot D_{n_d}} = \frac{0,1 \cdot 4}{\pi \cdot 10} = 0,01273 \quad (4.5)$$

kde s_{z_d} značí posuv na zub při dokončování, z_d počet zubů dokončovací frézy a D_{n_d} značí vnější průměr dokončovací frézy.

Obvodová síla od operace dokončovací frézování F_{o_d} je určena jako:

$$\begin{aligned} F_{o_d} &= k_F \cdot S_{t_d} \cdot q_n \cdot k_{t_d} = 1,2 \cdot 10 \cdot 2700 \cdot 0,01273 \\ &= 412,45 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.6)$$

kde k_F značí bezpečnost při návrhu maximální síly.

Maximální krouticí moment od operace dokončovací frézování M_{\max_d} při obrábění dílce (Obr.

4.2) pak vychází:

$$M_{\max_d} = F_{o_d} \cdot \frac{D_o}{2} = 412,45 \cdot \frac{0,17}{2} = 35,06 \text{ Nm} \quad (4.7)$$

kde D_o značí délku hrany obrobku.

4.2.2. Operace hrubovací frézování

Maximální průřez třísky S_{t_h} vychází z hloubky třísky a_{p_h} a šířky třísky b_h . Volím $a_{p_h} = 1 \text{ mm}$ a $b_h = 12 \text{ mm}$, pak průřez třísky vychází:

$$S_{t_h} = a_{p_h} \cdot b_h = 1 \cdot 12 = 12 \text{ mm}^2 \quad (4.8)$$

Součinitel korekce frézovaného průřezu k_{t_h} , který udává velikost korekce při návrhu řezné síly při operaci hrubování je určen vztahem:

$$k_{t_h} = \frac{s_{z_h} \cdot z_h}{\pi \cdot D_{n_h}} = \frac{0,4 \cdot 4}{\pi \cdot 12} = 0,0424 \quad (4.9)$$

kde s_{z_h} značí posuv na zub při hrubování, z_h počet zubů hrubovací frézy a D_{n_h} značí vnější průměr hrubovací frézy.

Obvodová síla od operace hrubovací frézování F_{o_h} je určena jako:

$$F_{o_h} = k_F \cdot S_{t_h} \cdot q_n \cdot k_{t_h} = 1,2 \cdot 12 \cdot 2700 \cdot 0,0424 = 1648,5 \text{ N} \quad (4.10)$$

Maximální kroutící moment od operace frézování hrubování M_{\max_h} při obrábění dílce (Obr. 4.2) pak vychází:

$$M_{\max_h} = F_{o_h} \cdot \frac{D_o}{2} = 1648,5 \cdot \frac{0,17}{2} = 140,12 \text{ Nm} \quad (4.11)$$

Výpočet proveden dle [49]

4.2.3. Operace vrtání

Pro stanovení osově síly od vrtání byla využita experimentálně změřená data z Tab. 2. V tabulce jsou zobrazeny hodnoty sil při vrtání pro různé průměry vrtáků a posuvů. Hodnoty sil jsou vyjádřeny v kilopondech.

Tab. 2 – Hodnoty sil působících od jednotlivých vrtáků [50]

Materiál obrobku	Průměr vrtáku [mm] a posuv [mm ot ⁻¹]											
	5		10		20		30		40		50	
	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,4	0,6
Ocel 90 kp mm ⁻²	80	130	230	350	600	800	1 200	1 500	1 600	2 400	2 600	3 200
Ocel 60 kp mm ⁻²	50	90	150	220	450	600	850	1 150	1 200	1 800	1 900	2 600
Šedá litina	35	70	110	150	280	360	550	700	720	1 000	1 100	1 800
Mosaz	25	50	100	140	210	280	340	425	440	585	680	1 100
Slitina hliníku tvářená	20	40	85	115	160	215	260	330	340	450	500	800

Pro vrtání byl zvolen vrták o průměru 10 mm a zvolena rychlost posuvu 0,2 mm/ot. Síla při operaci vrtání pak vychází:

$$F_v = 350 \cdot 9,807 = 3\,432,5 \text{ N} \quad (4.12)$$

Při vrtání dílce (Obr. 4.2) pak kroutící moment M_{\max_v} vychází:

$$M_{\max_v} = F_v \cdot \frac{D_o}{2} = 3\,432,5 \cdot \frac{0,17}{2} = 291,76 \text{ Nm} \quad (4.13)$$

4.2.4. Zhodnocení působících sil

Byly vypočteny hodnoty sil a kroutících momentů působících na osu u třech referenčních technologických operacích. Hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 3.

Tab. 3 – Hodnoty působících sil a kroutících momentů

Operace	Síla [N]	Moment [Nm]
Frézování dokončování	412,45	35,06
Frézování hrubování	1648,5	140,12
Vrtání	3 432,5	291,76

Největší síla i největší moment vzniká od operace vrtání. Tato hodnota by se mohla eliminovat předvrtáním menší díry a až potom větším vrtákem. Tato změna by byla však na úkor produktivity. Na hodnotu síly a momentu od operace vrtání tedy budou dimenzovány komponenty rotační osy.

5. Návrhy variant polohovacího zařízení

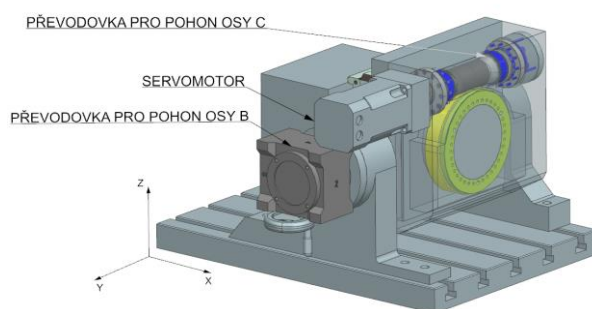
Následující kapitola popisuje koncepční návrhy manipulace s polotvarem v pracovním prostoru a vlastní polohovací zařízení.

5.1. 1. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Y

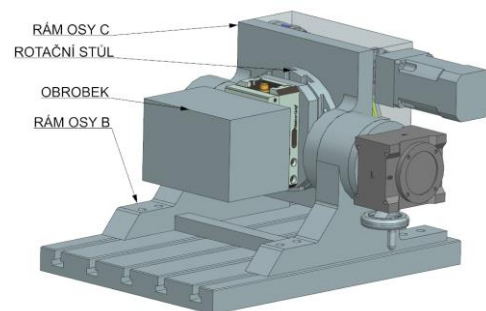
Tab. 4 – Použité komponenty varianta 1

Servomotor TG Drive TGN4-0750	
Jmenovitý moment [Nm]	6,1
Jmenovité otáčky [min ⁻¹]	3000
Maximální moment [Nm]	22,5
Převodovka pro pohon osy C - OTT 4804 SSR R4	
Převod [1]	70
Kroutící moment při 0 ot./min	443
Převodovka pro ruční pohon osy B - ATEK SC050	
Převod [1]	100

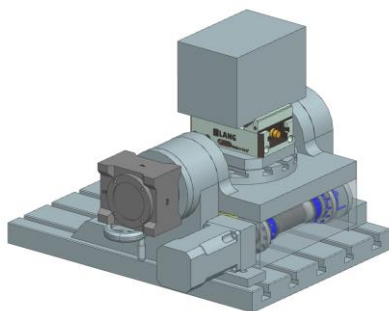
Následující tři varianty jsou charakteristické použitím dvou rotačních os. Osa C je ovládána řídicím systémem stroje a osa B ručním kolem. Nevýhodou této první varianty je méně tuhá konstrukce rámu osy B. Při najetí do nulové polohy natočení v ose B (Obr. 5.1) je nutné zajistit přístup servomotoru do této polohy. Šneková převodovka osy C je zde navíc značně předimenzovaná kvůli velké osové vzdálenosti a problematické je i její mazání.



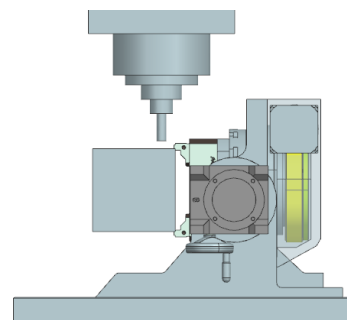
Obr. 5.3 – 1. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Y



Obr. 5.4 – 1. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Y



Obr. 5.1 – Nulová poloha natočení osy B



Obr. 5.2 – Pohled ze směru obsluhy

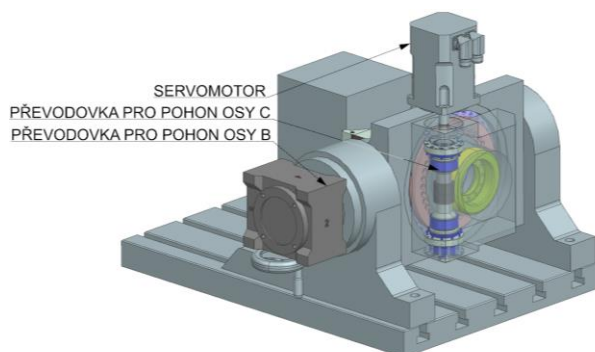
5.2. 2. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Z

Tento návrh se od předchozího návrhu liší pootočeným servomotorem a šnekovou převodovkou o 90 stupňů. Tímto způsobem se mohla zvolit menší převodovka a rám osy B byl oproti předchozí variantě zesílen. V Tab. 5 jsou uvedeny použité komponenty.

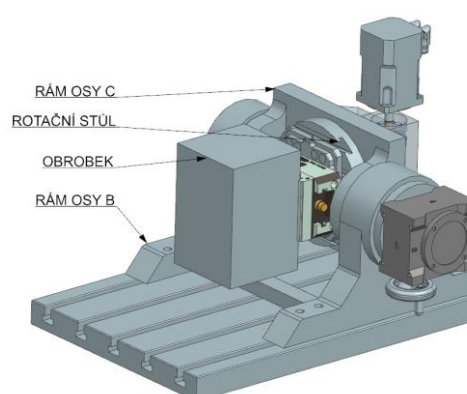
Tab. 5 – Použité komponenty varianta 2

Servomotor TG Drive TGN4-0510	
Jmenovitý moment [Nm]	4,2
Jmenovité otáčky [min ⁻¹]	3000
Maximální moment [Nm]	15,3
Převodovka pro pohon osy C - OTT 4873 SSR R4	
Převod [1]	90
Kroutící moment při 0 ot./min	86
Převodovka pro ruční pohon osy B - ATEK SC050	
Převod [1]	100

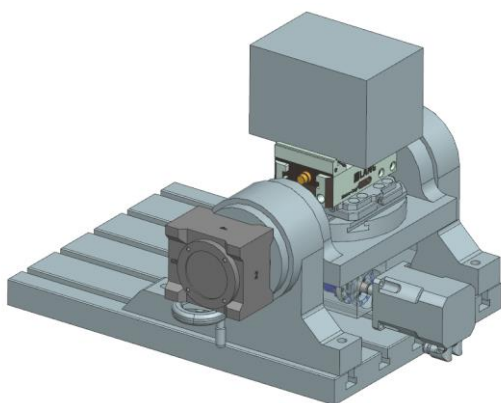
Nevýhodou této konstrukce je možná kolize s vřetenem obráběcího stroje (Obr. 5.8) a větší nevyváženost osy B, což je dáno především servomotorem umístěným daleko od osy rotace osy B.



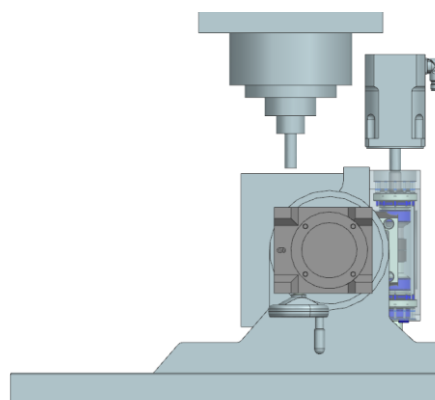
Obr. 5.5 – 2. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Z



Obr. 5.6 – 2. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Z



Obr. 5.7 – Nulová poloha natočení osy B



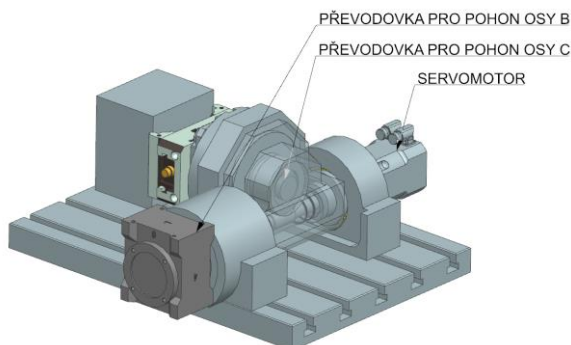
Obr. 5.8 – Pohled ze směru obsluhy

5.3. 3. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem v ose B

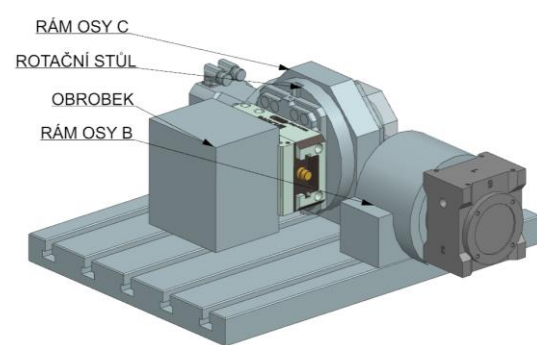
Oproti předchozím návrhům je u této varianty servomotor koncipován jako součást rotační osy B. Výhodou této varianty je neomezený přístup vřetene k obrobku. Příznivé jsou také podmínky pro mazání šnekové převodovky. U této varianty by ale bylo nutné navrhnout výkonný brzdový systém pro osu B, celkově je totiž osa hodně nevyvážená kvůli velké vzdálenosti os B a C a vzdálenosti obrobku od osy rotace osy B (Obr. 5.12). V Tab. 6 jsou uvedeny použité komponenty.

Tab. 6 – Použité komponenty varianta 3

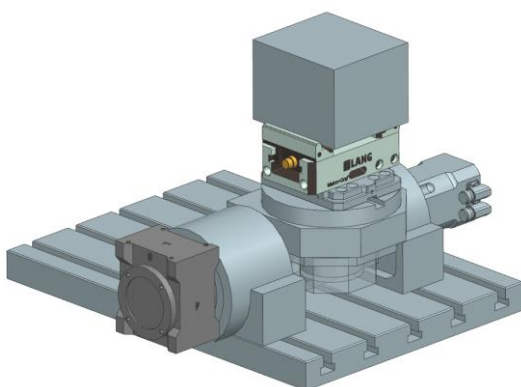
Servomotor TG Drive TGN4-0510	
Jmenovitý moment [Nm]	4,2
Jmenovité otáčky $[\text{min}^{-1}]$	3000
Maximální moment [Nm]	15,3
Převodovka pro pohon osy C - OTT 4812 SSR R4	
Převod [1]	90
Krouticí moment při 0 ot./min	60
Převodovka pro ruční pohon osy B - ATEK SC050	
Převod [1]	100



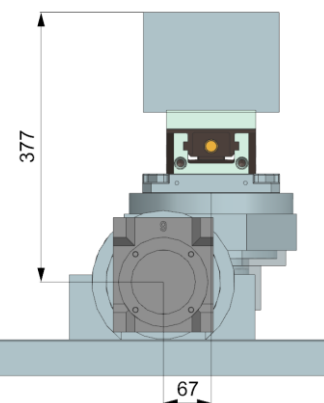
Obr. 5.9 – 3. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem v ose B



Obr. 5.10 – 3. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem v ose B



Obr. 5.11 – Nulová poloha natočení osy B



Obr. 5.12 – Vzdálenost os B a C a vzdálenost hrany obrobku od osy B

5.4. 4. varianta - provedení jedné rotační osy

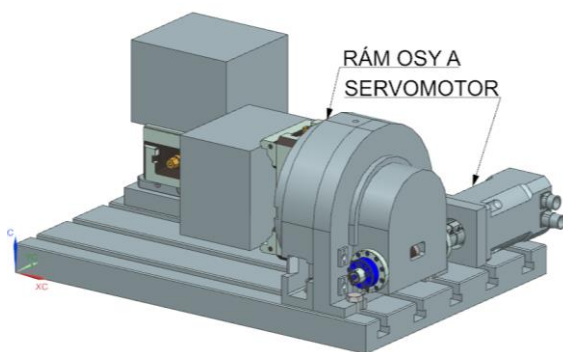
Následující dvě varianty jsou konstruovány jako jedna rotační strojem řízená osa. Toto řešení bylo motivované díky možnému využití upínacího systému „QUICK POINT“, díky kterému lze součást obrobít z pěti stran pomocí přeupnutí obrobku společně se svěrákem. Tyto dvě varianty navíc umožňují mít upnuté dva dílce – jeden v pevném svěráku a druhý na přídavné ose (Obr. 5.14 a Obr. 5.17). Výhodou variant s jednou osou je větší přesnost polohování, kterou neovlivňuje nepřesnost druhé přidané rotační osy. Další výhodou je neomezený přístup vřetene a nástrojů k obrobku.

Nevýhodou variant s jednou rotační osou je nutné přeupínání svěráku s obrobkem. U těžších obrobků bude nutné využít např. jeřáb či jiné manipulační zařízení.

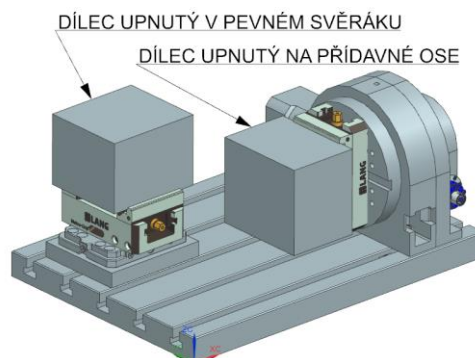
Tato varianta se skládá z rámu, redukci a rámu převodovky (Obr. 5.15). Tyto díly musí být vůči sobě přesně ustaveny, což je technologicky náročné. Navíc se osa pomocí inbus klíče špatně ustavuje na pracovní stůl (Obr. 5.15) V Tab. 7 jsou uvedeny použité komponenty.

Tab. 7 – Použité komponenty varianta 4

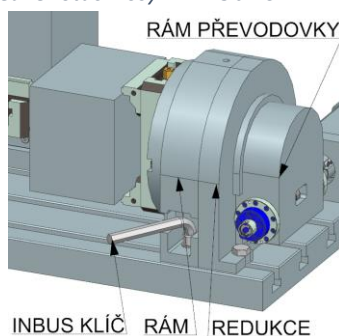
Servomotor TG Drive TGN4-0750	
Jmenovitý moment [Nm]	6,1
Jmenovité otáčky [min ⁻¹]	3000
Maximální moment [Nm]	22,5
Převodovka pro pohon osy C - OTT 4873 SSR R4	
Převod [1]	90
Krouticí moment při 0 ot./min	86



Obr. 5.13 – 4. varianta - provedení jedné rotační osy



Obr. 5.14 – 4. varianta – pozice dvou upnutých dílců



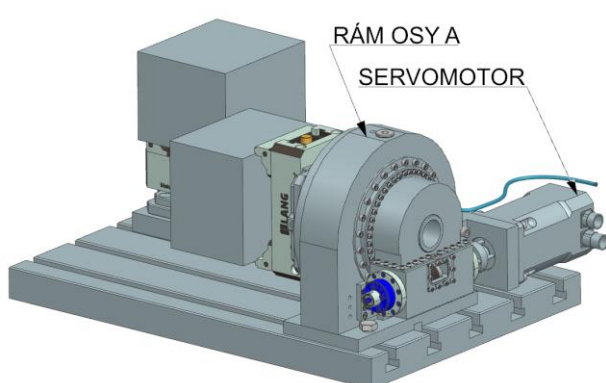
Obr. 5.15 – 4. varianta rotační osy a její ustavení na pracovní stůl

5.5. 5. varianta - provedení jedné rotační osy

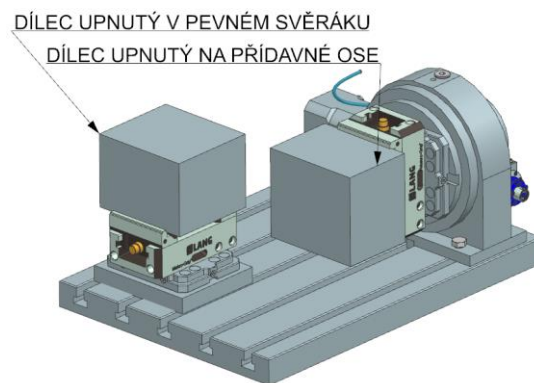
U této varianty není mezi rámem ložiska a převodovky redukční člen (Obr. 5.18), což usnadní snadnější ustavení šnekového kola a šnekové hřídele vůči sobě. Rám ložiska je pro snadnější montáž přimontován k desce, která se pomocí čtyř šestihranných šroubů montuje na stůl stroje. Způsob dotažení čtyř šestihranných šroubů zde není výrazně omezován. Tab. 8 zobrazuje použité komponenty u této varianty.

Tab. 8 – Použité komponenty varianta 5

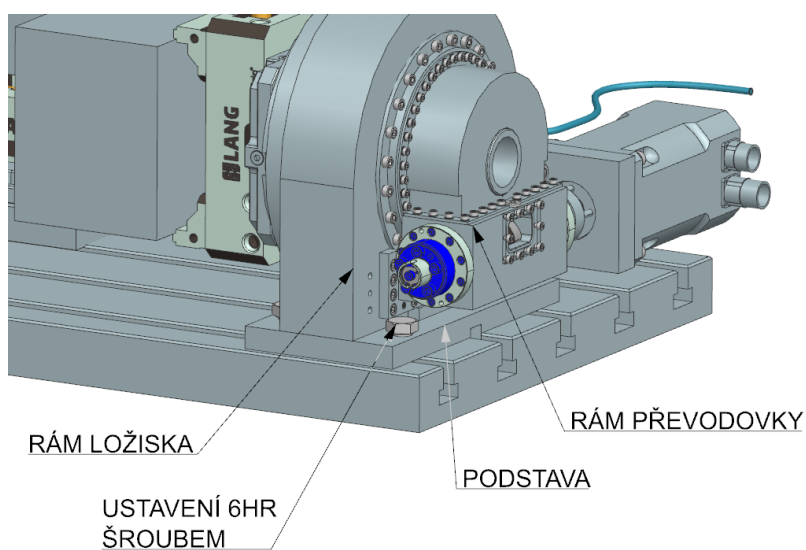
Servomotor TG Drive TGN4-0750	
Jmenovitý moment [Nm]	6,1
Jmenovité otáčky [min^{-1}]	3000
Maximální moment [Nm]	22,5
Převodovka pro pohon osy C - OTT 4873 SSR R4	
Převod [1]	90
Krouticí moment při 0 ot./min	86



Obr. 5.16 – 5. varianta - provedení jedné rotační osy



Obr. 5.17 – 5. varianta – pozice dvou upnutých dílců



Obr. 5.18 – 5. varianta rotační osy a její ustavení na pracovní stůl

5.6. Výběr varianty

V Tab. 9 jsou obodovány jednotlivé varianty podle zvolených kritérií. K variantám jsou přiřazeny body od 1 do 5 podle toho, jak daná varianta vyhovuje danému kritériu. Varianta s nejvíce body bude následně dále zpracovávána.

Tab. 9 – Přiřazené body k jednotlivým variantám podle kritérií

	Přístup k obrobku	Konstrukční a výrobní náročnost	Výrobní možnosti	Nosnost	Cena	Součet bodů
Varianta 1	2	2	5	1	1	11
Varianta 2	1	2	3	3	1	10
Varianta 3	5	1	5	1	1	13
Varianta 4	5	3	1	5	4	18
Varianta 5	5	5	1	5	5	21

Přístup k obrobku je stejný pro varianty 3, 4 a 5, a byly jim proto přiděleny stejné body. Konstrukční a výrobní náročnost byla nejhorší pro provedení dvou rotačních os. Tento faktor byl ovlivněn malým zástavbovým prostorem pro dvě rotační osy.

Výrobní možnosti byly dobře splněny u variant 1, 2 a 3 v provedení dvou rotačních os. Pomocí dvou rotačních os se zvýší technologické možnosti stroje např. možným vrtáním pod úhlem díky naklopení v ose B.

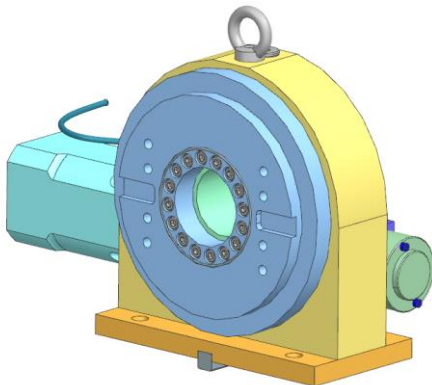
Provedení s jednou rotační osou disponuje robustním rámem, a tak má v důsledku vyšší nosnost.

Cena komponent pro realizaci dvou rotačních os je očekávána vyšší než cena komponent pro jednu rotační osu.

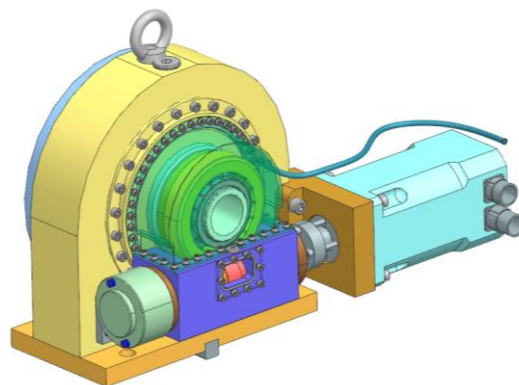
Varianta číslo 5 obdržela v součtu nejvíce bodů a stává se tak zvolenou variantou, kterou se bude tato práce dále zabývat.

6. Vlastní konstrukce přídatné osy

V této kapitole bude představena konstrukce přídatné osy.



Obr. 6.1 – Přídatná rotační osa

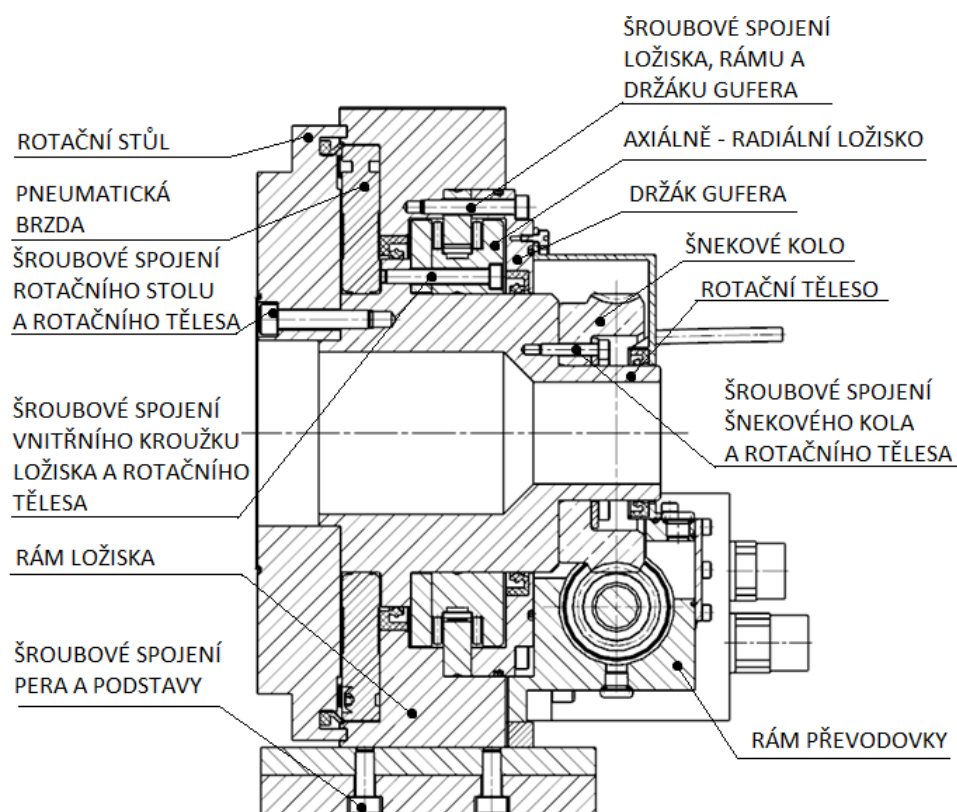


Obr. 6.2 – Přídatná rotační osa

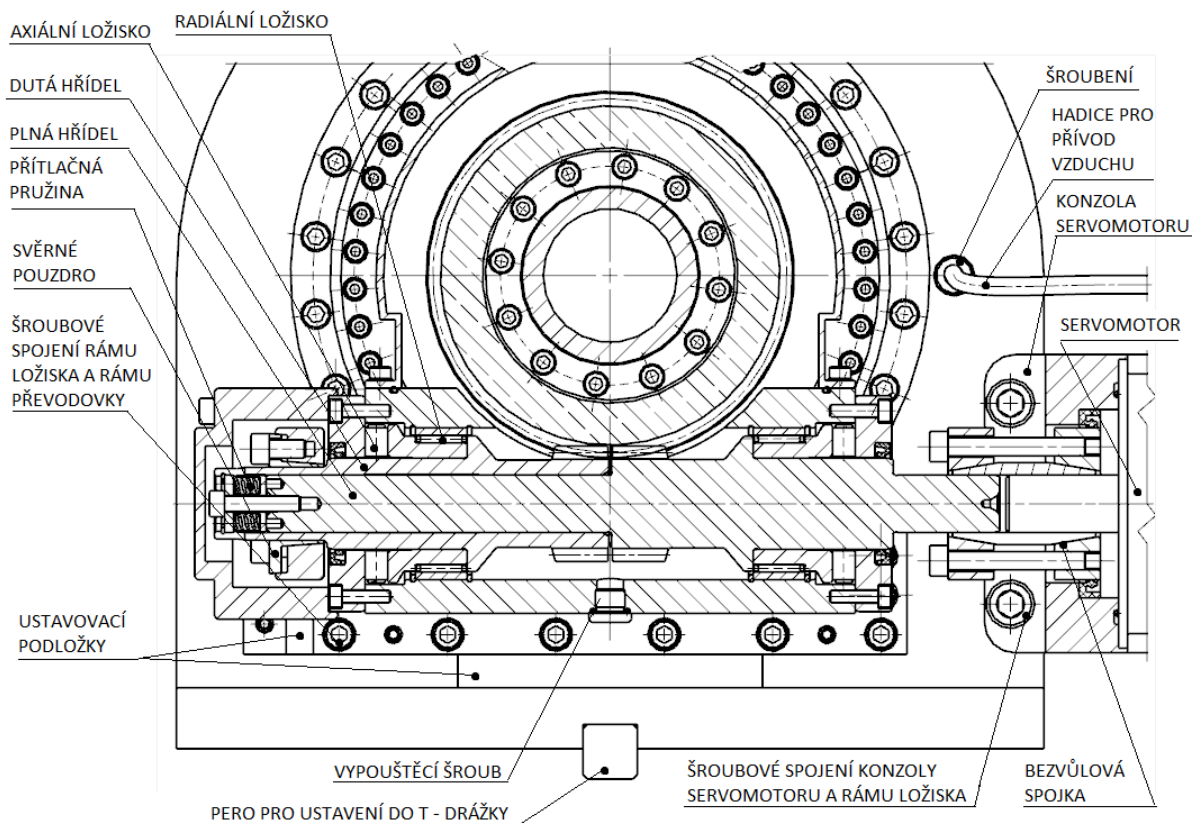
6.1. Vybrané komponenty dodavatelů

Pro vlastní konstrukci (Obr. 6.3 a Obr. 6.4) byly použity následující komponenty dodavatelů

- Servomotor firmy TG-drive, model TGN4-0750
- Bezvúlová spojka firmy KTR, model CLAMPEX KTR700 19x50
- Bezvúlová šneková převodovka firmy OTT, model G 75 4873 SSR
- Axiálně- radiální ložisko firmy FAG, model YRTC120XL
- Pneumatická brzda firmy HEMA, model RC120N



Obr. 6.3 – Zobrazení šroubových spojů a komponent



Obr. 6.4 – Zobrazení šnekového hřídele

6.1.1. Šneková převodovka

Kvůli nutnému zvýšení krouticího momentu na výstupu byla zvolena šneková převodovka s možností vymezení vůle. Podmínku vymezení vůle splňuje šneková převodovka od firmy OTT, která se specializuje na tyto typy převodových ústrojí. Princip vymezení vůle u tohoto převodového ústrojí byl vysvětlen v rešeršní části.

Od výrobce OTT byla zvolena šneková převodovka s označením 4873 SSR (Obr. 6.5). Výrobce udává životnost 20 000 hod při stálém zatěžování 86 Nm, což je pro operaci dokončovací frézování dostačující. Na jednu otáčku šnekového kola výrobce udává maximální odchylku natočení 43 úhlových vteřin, což splňuje požadavek na přesnost polohování rotační osy.



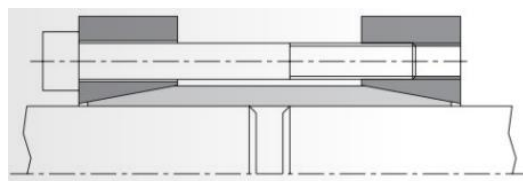
Obr. 6.5 – Šneková převodovka OTT [33]

6.1.2. Servomotor

Servomotor je pomocí konzoly přimontován k rámu přídavné osy, kde středící funkci zajišťuje použitá spojka. Servomotor má zabudované dva konektory – jeden slouží pro pohon rotoru a druhý pro přenos signálu z enkodéru. Tento typ servomotoru byl zvolen především kvůli enkodéru, který má dostatečné rozlišení pro proces obrábění. Dalším faktorem byla kompatibilita s řídicím systémem stroje MIKRON VCE 600 Pro.

6.1.3. Bezvůlová spojka

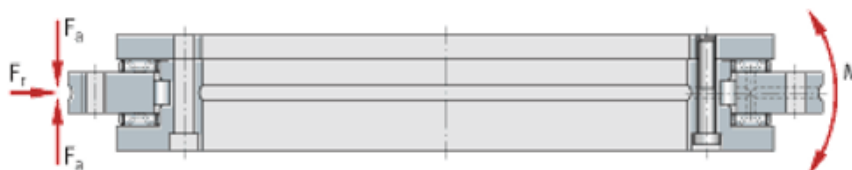
Spojení hřídele servomotoru a hřídele šnekového hřídele je realizováno bezvůlovou, ohybově a torzně tuhou spojkou CLAMPEX KTR700 (Obr. 6.6). Jde o méně nákladnější variantu spojky z důvodu jednoduchého provedení. Dotažením šroubů se po sobě posouvají šikmé plochy a je tak vyvozena třecí síla, která dokáže přenášet kroutící moment. Tato spojka však nepohlcuje ohybové momenty, je tedy nutné zajistit, aby hřídel servomotoru a hřídel šnekové hřídele byly sousedé. Při nerespektování této zásady bychom nepříznivě namáhaly ložiska obou hřídelů a zkracovaly tak životnost celého zařízení.



Obr. 6.6 – Bezvůlová ohybově a torzně tuhá spojka KTR700 [51]

6.1.4. Axiálně – radiální ložisko

Jako rotační vedení bylo zvoleno ložisko firmy INA, model YRTC120XL. Toto ložisko je vybaveno sadou válečků, které umožňuje zachytávat axiální síly, radiální síly a klopné momenty (Obr. 6.7). Ložisko se ustavuje pomocí sady šroubů do tělesa ložiska. Pro tento typ ložiska byl v rámu zhotoven mazací kanál s maznicí – příloha výkres sestavy. Mazací intervaly jsou pak dodány výrobcem ložiska podle provozovaných otáček, zatížení a doby provozu. Axiálně – radiální ložiska se dodávají i s odměřovacím systémem vnitřního kroužku, ale výrobce tímto systémem vybavuje ložiska vyšších řad, než je zvolené ložisko. Ložisko bylo zvoleno koncepčně větší, kvůli dostatečné tuhosti při obráběcím procesu.



Obr. 6.7 – Axiálně - radiální ložisko INA YRTC120XL [52]

6.1.5. Pneumatická brzda

Pneumatická brzda firmy HEMA, model RC120N (Obr. 6.8) byla zvolena z důvodu zajištění vyššího brzdného momentu, než je brzdný moment šnekové převodovky při nulových otáčkách a pro ochranu šnekové převodovky před možnou kolizí nástroje. Při kolizi by mohl být do záběru ozubení převodovky přenesen velký ráz a zapříčinit tak poškození drahé převodovky. Zvolená brzda funguje v pasivním režimu, což znamená, že v základní poloze stlačuje vzduch vnější povrch pružinové membrány, čímž je stlačován břit na cementované válcové plochu rotačního tělesa. K odbrzdění se přivede stlačený vzduch o tlaku 6 bar do vnitřního prostoru pružinové membrány a dojde tak k uvolnění. Brzda se vystředí na rotačním tělese, čímž je stanovena přesná poloha a poté se dotahují šrouby po obvodu disku.



Obr. 6.8 – Montáž pneumatické brzdy HEMA [47]

7. Ustavení zařízení a přeprava

Zařízení (Obr. 6.1) se upíná pomocí čtyř šroubů a vodící lišty přímo na pracovní stůl. Celé zařízení váží 83 kg a předpokládá se transport pomocí jeřábu. Pro transport je v rámu zhotoven otvor se závitem pro instalaci šroubu s okem.

8. Implementace zařízení do stroje Mikron VCE 600 Pro

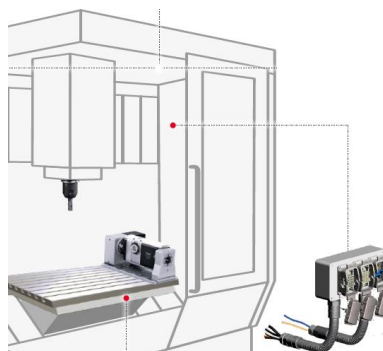
Frézovací vertikální centrum Mikron VCE 600 Pro je již v základním provedení vybaveno výkonovým modulem pro přídatnou osu „měničem“.

Pro úplnou funkčnost zařízení bude nutné:

- Upravit softwarový převodník dat z CAM systému v počítači do datového jazyka stroje - „postprocessor“.
- Upravit parametry stroje – aktivovat funkci přídatné osy v parametrech stroje.
- Zakomponovat do stroje konektory, které umožní rychle odpojit zařízení (Obr. 8.2).
- Z konektorů vyvézt silový kabel, kabel odměřování, hadici pro vzduch (Obr. 8.1) a zapojit do připraveného modulu v rozvodné skříni stroje.



Obr. 8.1 – Kabel silový, kabel odměřování a hadice pro stlačený vzduch [5]



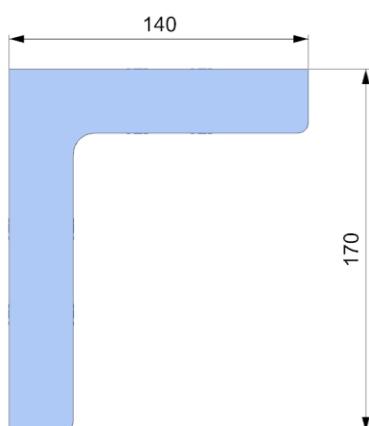
Obr. 8.2 – Instalace konektorů na stěnu ve vnitřním obráběcím prostoru stroje [5]

9. Technologie výroby a ekonomické zhodnocení

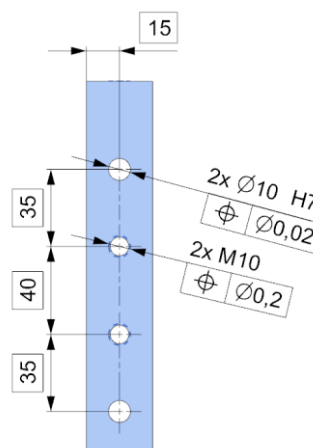
V této kapitole bude představena a porovnána technologie výroby konkrétního dílce. Na základě výrobních časů pak bude provedeno ekonomické zhodnocení. Ekonomické zhodnocení je provedeno s pomocí hodinové režijní sazby (HRS), ve které jsou započítány režijní náklady na stroj a osobní náklady operátora stroje. Časy jednotlivých operací, úseků a úkonů byly zjištěny z podnikových dat.

9.1. Technologie výroby

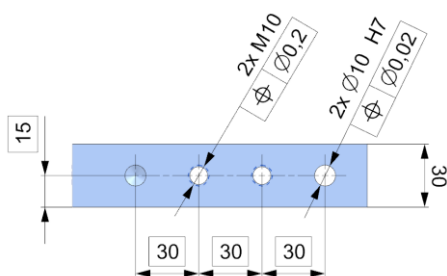
V této kapitole bude představena výroba konkrétního dílce s pomocí přídavné osy a ekonomické zhodnocení při uvažování přídavné osy a bez ní. Pro ekonomické zhodnocení budeme uvažovat výrobu jednoduchého dílce vyžadujícího technologické operace jako je frézování, vrtání, vystružování a závitování (Obr. 9.1 až Obr. 9.4).



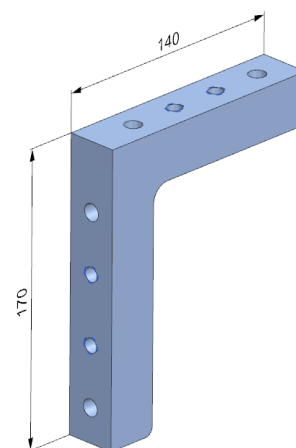
Obr. 9.1 – Dílec – pohled zepředu



Obr. 9.2 – Dílec – pohled zleva



Obr. 9.3 – Dílec – pohled shora



Obr. 9.4 – Dílec 3D pohled

9.1.1. Technologie výroby dílce bez přídavné osy

V této kapitole je představena technologie výroby jednoduchého dílce (Obr. 9.4) na tříosé vertikální frézce bez uvažování přídavné osy. Výrobní postup je zpracován v technologickém postupu, který je součástí práce: Technologický postup výroby bez přídavné osy.

- 1) V první operaci se dělí polotvar s přídavkem na pásové pile. Polotvar je poté upnut do tvarových čelistí upínacího systému a obráběn v prvním úseku čelní frézou s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD).
- 2) Ve druhém úseku se vymění čelní fréza za hrubovací rychloposuvovou frézu s VBD a obrobí se s přídavkem obrys součásti.
- 3) Ve třetím úseku se obrábí obrys součásti monolitickou dokončovací frézou. Následně je obrobek vyndán z upínacího systému a znovu upnut za obrobenou plochu na univerzální frézku. Nyní se obrobek upíná v hladkých čelistech, které nepoškozují již obrobený povrch. V této operaci následuje obrobení na rozměr 30 mm (Obr. 9.3) čelní frézou. Obrobek se následně musí opět sundat a míří zpět na vertikální frézovací centrum. Obrobek je upnut za obrobené plochy a následují úseky vrtání, sražení hran, závitování a vystružování (Obr. 9.2).
- 4) V poslední úseku se obrobek opět vyjme z upínacího systému, je otočen o 90° a je znovu upnut. Opět je provedeno vrtání, sražení hran, závitování a vystružování (Obr. 9.3). Po vyjmutí obrobku ze stroje je provedeno ruční sražení hran a obrobek je hotov.

9.1.2. Technologie výroby dílce s přídavnou osou

V této kapitole je představena technologie výroby stejného dílce (Obr. 9.4) na tříosé vertikální frézce s uvažováním přídavné osy. Nárůstu produktivity je dosaženo obráběním dvou obrobků v pracovním prostoru stroje, použitím přídavné osy, upínacího systému „QUICK POINT“ a sady dvou svěráků.

Upínací systém „QUICK POINT“ se skládá z desky, ve které jsou zhotovené přesné otvory. V nich se posouvají čepy, ty dokážou vyvodit vysokou sílu na ustavovací čepy, které jsou součástí svěráku (Obr. 9.6). Dotažením šroubu inbusovým klíčem (Obr. 9.5) tak vzniká přídržná síla až 20 000 N s přesností upnutí $\pm 0,02$ mm.



Obr. 9.5- Upínací deska systému „QUICK POINT“ firmy LANG TECHNIK [43]



Obr. 9.6 - Svěrák firmy LANG TECHNIK s nastavovacími čepy [53]

Ve stroji jsou připravené upínací desky se systémem „QUICK POINT“ a svěráky jsou odloženy mimo pracovní prostor. Pro popis jsou použity operace zobrazené v technologickém postupu výroby bez přídavné osy, výrobní postup je popsán slovně a je detailně zpracován v technologickém postupu, který je součástí práce: Technologický postup výroby s přídavnou osou.

- 1) V první operaci se oddělí dva kusy dílců (J a K) s přídavkem na pásové pile.
- 2) Dílec J je poté upnut do tvarových čelistí svěráku a společně je tato sestava upnuta na upínací desku, která je součástí pracovního stolu. Nyní může proběhnout operace 20, která je stejná jako v technologickém postupu bez přídavné osy.
- 3) Následně je dílec J společně se svěrákem vyndán z upínacího systému a znovu upnut v patřičné přesnosti na rotační desku přídavné osy, která je také opatřena stejnou upínací deskou.
- 4) Druhý svěrák společně s dílcem K je upnut na volnou upínací desku, která je součástí pracovního stolu. Nyní je možné spustit program, ve kterém se provede operace 20 pro dílec K a po skončení této operace může plynule navázat část programu, která na dílci J provede operaci 40. Tato operace může díky otočení osy A o 90° proběhnout automaticky bez zásahu obsluhy.
- 5) Dílec J je vyjmut z pracovního prostoru stroje i se svěrákem. Zároveň je rozebrána sestava dílce J a svěráku. Dílec J směřuje na konvenční frézku, kde proběhne operace 30. Po ručním sražení hran a kontrole je dílec J hotov.
- 6) Mezitím je dílec K společně se svěrákem vyndán z upínacího systému a znovu upnut v patřičné přesnosti na rotační desku přídavné osy.
- 7) Nyní může být upnut další dílec, který se upne do volného svěráku. Celá sestava se opět upne na upínací desku, která je součástí pracovního stolu. Nyní je stroj připraven na spuštění stejného programu a může začít opakovaný cyklus.

Kvůli stejnému postupu už zde není vypsán sled operací, úseků a úkonů pro opracování dílce K. Od úseku 60.7. do operace 70, úkonu 70.1.1. je postup stejný.

9.2. Ekonomické zhodnocení

9.2.1. Náklady na výrobu jednoho kusu bez přídatné osy

Časy úseků ($t_{xx.x.x.}$) a úkonů ($t_{xx.x.}$) lze sečíst, čímž dostaneme časy operací pro:

- Pásovou pilu Bomar Ergonomic DG (t_{10})
- Vertikální frézovací centrum MIKRON VCE 600 Pro (t_{20}, t_{40})
- Univerzální frézku EMCO FB 5 (t_{30})

$$t_{10} = t_{10.1.} + t_{10.1.1.} = 3,1 + 2,5 = 5,6 \text{ min} \quad (9.1)$$

$$t_{20} = t_{20.1.} + t_{20.1.1.} + t_{20.2.} + t_{20.3.} = 3 + 2,5 + 5 + 1 = 11,5 \text{ min} \quad (9.2)$$

$$t_{30} = t_{30.1.} + t_{30.1.1.} = 15 + 10 = 25 \text{ min} \quad (9.3)$$

$$\begin{aligned} t_{40} &= t_{40.1.} + t_{40.1.1.} + t_{40.2.} + t_{40.3.} + t_{40.4.} + t_{40.5.} + t_{40.6.} \\ &\quad + t_{40.6.1.} + t_{40.7.} + t_{40.8.} + t_{40.9.} + t_{40.10.} \\ &\quad + t_{40.10.1.} \\ &= 1,1 + 10 + 1,1 + 0,3 + 0,5 + 0,9 + 1,1 \\ &\quad + 10 + 1,1 + 0,3 + 0,5 + 0,9 + 10 \\ &= 37,8 \text{ min} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Celkové náklady na výrobu jednoho kusu bez přídatné osy NS_0 lze pak stanovit podle (9.5) jako:

$$\begin{aligned} NS_0 &= HRS_1 \cdot t_{10} + HRS_2 \cdot t_{20} + HRS_3 \cdot t_{30} + HRS_2 \cdot t_{40} \\ &= 400 \cdot \frac{5,6}{60} + 1\,000 \cdot \frac{11,5}{60} + 600 \cdot \frac{25}{60} \\ &\quad + 1\,000 \cdot \frac{37,8}{60} = 1\,109 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (9.5)$$

kde HRS_1 značí hodinovou režijní sazbu pro pásovou pilu Bomar Ergonomic DG, HRS_2 hodinovou režijní sazbu pro vertikální frézovací centrum MIKRON VCE 600 Pro a HRS_3 hodinovou režijní sazbu pro univerzální frézku EMCO FB 5.

Celkový čas výroby jednoho kusu bez přídatné osy t_b pak vychází:

$$t_b = t_{10} + t_{20} + t_{30} + t_{40} = 5,6 + 11,5 + 25 + 37,8 = 79,9 \approx 80 \text{ min} \quad (9.6)$$

9.2.2. Náklady na výrobu jednoho kusu s přídatnou osou

V tomto výpočtu je zohledněna výroba dvou dílců na všech strojích díky možnému upnutí dvou dílců v obráběcím prostoru stroje MIKRON VCE 600 Pro.

Časy úseků ($t_{xx.x.x.}$) a úkonů ($t_{xx.x.}$) lze sečíst, čímž dostaneme časy operací pro:

- Pásovou pilu Bomar Ergonomic DG (t_{50})
- Vertikální frézovací centrum MIKRON VCE 600 Pro (t_{60})
- Univerzální frézku EMCO FB 5 (t_{70})

$$t_{50} = (t_{50.1.} + t_{50.1.1.}) \cdot 2 = (3,1 + 2,5) \cdot 2 = 11,2 \text{ min} \quad (9.7)$$

$$\begin{aligned} t_{60} &= t_{60.1.} + t_{60.1.1.} + t_{60.2.} + t_{60.3.} + t_{60.4.} + t_{60.4.1.} + t_{60.5.} \\ &\quad + t_{60.6.} \\ &\quad + (t_{60.7.} + t_{60.8.} + t_{60.9.} + t_{60.10.} + t_{60.11.} \\ &\quad + t_{60.12.} + t_{60.13.} + t_{60.14.} + t_{60.15.} + t_{60.16.} \\ &\quad + t_{60.16.1.}) \cdot 2 \\ &= 3 + 2,5 + 5 + 1 + 3 + 4 + 5 + 1 \\ &\quad + (1,1 + 1,1 + 0,3 + 0,5 + 0,9 + 1,1 + 1,1 \\ &\quad + 0,3 + 0,5 + 0,9 + 2) \cdot 2 = 44,1 \text{ min} \end{aligned} \quad (9.8)$$

$$t_{70} = (t_{70.1.} + t_{70.1.1.}) \cdot 2 = (15 + 10) \cdot 2 = 50 \text{ min} \quad (9.9)$$

Celkové náklady na výrobu dvou kusů s přídatnou osou NS_2 lze stanovit podle (9.10):

$$\begin{aligned} NS_2 &= HRS_1 \cdot t_{50} + HRS_2 \cdot t_{60} + HRS_3 \cdot t_{70} \\ &= 400 \cdot \frac{11,2}{60} + 1\,000 \cdot \frac{44,1}{60} + 600 \cdot \frac{50}{60} \\ &= 1\,309,67 \approx 1\,310 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (9.10)$$

Celkové náklady na výrobu jednoho kusu s přídatnou osou NS_1 lze pak vycházet:

$$NS_1 = \frac{NS_2}{2} = \frac{1\,310}{2} = 655 \text{ Kč} \quad (9.11)$$

Celkový čas na výrobu jednoho kusu t_p s přídatnou osou činí:

$$\begin{aligned} t_p &= \frac{t_{50} + t_{60} + t_{70}}{2} = 11,2 + 44,1 + 50 = 52,65 \\ &\approx 53 \text{ min} \end{aligned} \quad (9.12)$$

9.2.3. Ušetřené náklady

Ušetřené náklady na výrobu při použití přídatné osy ΔNS pro jeden dílec (Obr. 9.4) lze tedy stanovit podle (9.13):

$$\Delta NS = NS_0 - NS_1 = 1\,109 - 655 = 454 \text{ Kč} \quad (9.13)$$

Ušetřené náklady v % pro jeden dílec $\Delta NS_{\%}$ vychází:

$$\Delta NS_{\%} = \frac{100 \cdot \Delta NS}{NS_0} = \frac{100 \cdot 454}{1\,109} = 40,94 \approx 41 \% \quad (9.14)$$

Náklady na různý počet kusů jsou zobrazeny v Tab. 10.

Tab. 10 - Náklady na výrobu a ušetřené náklady podle počtu kusů

	1 ks	10 ks	18 ks	100 ks	1000 ks
NS_0 [Kč]	1 109	11 090	19 962	110 900	1 109 000
NS_1 [Kč]	655	6 550	11 790	65 500	655 000
ΔNS [Kč]	454	4 540	8 172	45 400	454 000

9.2.4. Náklady na pořízení přídatné osy a návratnost investice

V Tab. 11 jsou uvedeny ceny komponent pro přídatnou osu (Obr. 6.1).

Tab. 11 - Náklady na pořízení přídatné osy

Položka	Cena
Šneková převodovka	79 000 Kč
Servomotor	25 000 Kč
Axiálně-radiální ložisko	40 000 Kč
Pneumatická brzda	24 000 Kč
Postprocessor a změna parametrů stroje	75 000 Kč
Předpokládané náklady na výrobu a na oživení	100 000 Kč
Celková cena přídatné osy CC_{po}	343 000 Kč

Firma Lehmann, jenž vybavuje stroje značky Mikron ve svém portfoliu nabízí podobné zařízení. Jedná se o přídatnou osu EA-520 a jeho cena je 577 300 Kč.

Při dvousměnném provozu a při výrobě dílců na stroji s přídatnou osou lze stanovit výrobní kapacitu 18 ks za den. Pomocí ušetřených nákladů pro 18 kusů ΔNS_{18} a celkové ceny přídatné osy CC_{po} lze vypočítat přibližnou dobu návratu investice NI .

$$NI = \frac{CC_{po}}{\Delta NS_{18}} = \frac{343\,000}{8\,172} = 42 \text{ dní} \quad (9.15)$$

Při sériové výrobě dílců a výrobní kapacitě 18 ks za den by byla doba nutná pro splacení investice 42 dní, což odpovídá přibližně 9 pracovním týdnům.

9.3. Výpočtová část

9.3.1. Výpočet zrychlení rotační osy

V tomto výpočtu bude zjištěno úhlové zrychlení rotační osy. Zrychlení rotační osy bylo vypočítáno metodou redukce, v tomto případě redukováním momentů setrvačnosti na hřídel servomotoru. V Tab. 12 jsou zobrazeny velikosti momentů setrvačnosti pro jednotlivé rotující součásti, které byly zjištěny z katalogů dodavatelů nebo v modelovacím prostředí softwaru Siemens NX.

Tab. 12 – Momenty setrvačnosti rotujících součástí

Rotující člen	Označení	Moment setrvačnosti [$kg \cdot mm^2$]
Hřídel servomotoru	I_1	326
Spojka	I_2	155
Hřídel šneku	I_3	442
Šnekové kolo	I_4	4 410
Rotační těleso	I_5	1 6336
Axiálně- radiální ložisko	I_6	21 600
Sestava svěráku a obrobku	I_7	371 511

Moment setrvačnosti redukovaný na motor lze vypočítat podle vztahu (9.16):

$$\frac{1}{2} \cdot I_{red} \cdot \omega_{in}^2 = \frac{1}{2} \cdot I_{in} \cdot \omega_{in}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{out} \cdot \omega_{out}^2 \quad (9.16)$$

kde I_{red} je nahrazovaný redukovaný moment hřídele servomotoru, ω_{in} je úhlová rychlost šnekové hřídele, ω_{out} je úhlová rychlost šnekového kola, I_{in} je součet momentů setrvačnosti rotujících součástí před šnekovou převodovkou a I_{out} je součet momentů setrvačnosti rotujících součástí za šnekovou převodovkou.

$$I_{in} = I_1 + I_2 + I_3 = 326 + 155 + 442 = 923 \text{ kg} \cdot mm^2 \quad (9.17)$$

$$\begin{aligned} I_{out} &= I_4 + I_5 + I_6 + I_7 \\ &= 4\,410 + 16\,336 + 21\,600 + 371\,511 \\ &= 413\,857 \text{ kg} \cdot mm^2 \end{aligned} \quad (9.18)$$

S použitím vztahu pro převodový poměr (9.19)

$$i = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \quad (9.19)$$

kde i je převodový poměr šnekové převodovky, lze hodnotu redukovaného momentu vyjádřit následovně:

$$\begin{aligned} I_{red} &= I_{in} + I_{out} \cdot \frac{1}{i^2} = 923 + 413\,857 \cdot \frac{1}{90^2} \\ &= 974 \text{ kg} \cdot mm^2 = 9,74 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot m^2 \end{aligned} \quad (9.20)$$

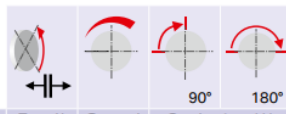
Podle vztahu (9.21) lze dopočítat velikost úhlového zrychlení osy α pro daný jmenovitý moment servomotoru M_k .

$$\alpha = \frac{M_k}{i \cdot I_{red}} = \frac{6,1}{90 \cdot 9,74 \cdot 10^{-4}} = 69,6 \text{ s}^{-2} \quad (9.21)$$

9.3.2. Porovnání hodnoty času s výrobcem

Hodnotu úhlového zrychlení výrobci přídavných neuvádějí. Firma Lehmann u proporcčně podobné přídavné osy ale udává čas potřebný pro natočení o 90° . V této kapitole bude vypočten čas potřebný pro natočení navržené přídavné osy o 90° .

Antriebsdaten
(basierend auf Standardlast Kubus
gemäss S. 88/89)



		Motoren	Feed* [Nm]	Speed [min ⁻¹]	Cycle time*** [sec]	
MAVILOR / MOVINOR **	EA-507	BLS-072	120	111	0.26	0.39
	EA-508	BLS-072	70	210	0.23	0.29
	EA-510	BLS-072	250	80	0.30	0.49
	EA-511	BLS-072	150	160	0.23	0.31
	EA-520	BLS-073	440	50	0.41	0.71
	EA-520	LN-098	440	45	0.43	0.77
	EA-530	LN-098	650	40	0.52	0.89

Obr. 9.7 - Doba nutná pro otočení osy o 90° [5]

Výpočet času nutného k otočení rotační osy o 90° lze stanovit podle rovnice (9.22).

$$t_{90} = t_1 + t_2 + t_3 \quad (9.22)$$

kde t_1 je čas zrychlování, t_2 je čas rovnoměrného pohybu a t_3 je čas zpomalování. Čas zrychlování je volen stejný jako čas zpomalování, tedy $t_1 = t_3$. Maximální úhlová rychlost je omezena šnekovou převodovkou na $\omega_{max} = 3,57 \text{ s}^{-1}$. Čas zrychlení vychází:

$$t_1 = \frac{\omega_{max}}{\alpha} = \frac{3,57}{69,6} = 0,051 \text{ s} \quad (9.23)$$

Za čas t_1 urazí bod po kružnici úhel φ_1 , který lze určit podle (9.24):

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 69,6 \cdot 0,051^2 = 0,0905 \text{ rad} = 5,19^\circ \quad (9.24)$$

Jelikož je úhel φ_1 od zrychlení totožný s úhlem od zpomalení φ_3 , lze podle (9.25) vypočítat úhel φ_2 , kdy se bod pohybuje konstantní úhlovou rychlostí ω_2 . Úhel φ_2 vychází:

$$\varphi_2 = 90^\circ - \varphi_1 - \varphi_3 = 90^\circ - 5,19^\circ - 5,19^\circ = 79,63^\circ \quad (9.25)$$

Čas t_2 lze potom dopočíst podle (9.26):

$$t_2 = \frac{\varphi_2}{\omega_{max}} = \frac{79,63}{3,57} \cdot \frac{\pi}{180} = 0,39 \text{ s} \quad (9.26)$$

Čas potřebný pro natočení přídatné osy o 90° t_{90} podle pak vychází:

$$t_{90} = t_1 + t_2 + t_3 = 0,051 + 0,39 + 0,051 = 0,49 \text{ s} \quad (9.27)$$

Při porovnání s hodnotou z Obr. 9.7 lze konstatovat, že čas potřebný pro otočení osy o 90° u navrhovaného otočného stolu je vyšší o 0,06 s. Tato hodnota je pro naše použití zanedbatelná, rychlost polohování bude dostatečná.

9.3.3. Kontrola jmenovitého kroutícího momentu servomotoru

V této kapitole bude ověřen návrh servomotoru. Pro návrh jmenovitého kroutícího momentu servomotoru je nutné překonat odpory:

- Kroutícího momentu vzniklého od operace dokončovací frézování M_{\max_d}
- Třecího momentu v ložisku M_t
- Rozběhového kroutícího momentu servomotoru M_{kr}

Celkový odporový kroutící moment M_{celk} vychází:

$$M_{celk} = M_{\max_d} + M_t + M_{kr} = 35,06 + 7 + 22,5 = 48,01 \text{ Nm} \quad (9.28)$$

Předpokladem je, že stůl bude polohován pouze při operaci frézování dokončování. Podle vztahu (9.29), účinnosti převodu μ a převodovým číslem i lze spočítat potřebný kroutící moment servomotoru M_{k1} :

$$M_{k1} = \frac{M_{celk}}{\mu \cdot i} = \frac{48,01}{0,16 \cdot 90} = 4,48 \text{ Nm} \quad (9.29)$$

Zvolený servomotor disponuje jmenovitým kroutícím momentem $M_k = 6,1 \text{ Nm}$. Hodnota M_{k1} je menší než M_k , vybraný servomotor tedy lze použít.

9.3.4. Kontrola brzdného momentu při vrtání a hrubovacím frézování

V této kapitole bude vypočten maximální brzdný moment a porovnán s momenty od obráběcího procesu. Při operaci frézování hrubování a vrtání bude stůl zafixován v určité poloze pneumatickou brzdou. Brzdný moment vyvinutý pneumatickou brzdou M_{kb} a šnekovou převodovkou M_{ks} je tedy maximální brzdný moment M_{bmax} , který lze vyvinout.

$$M_{bmax} = M_{kb} + M_{ks} = 336 + 86 = 422 \text{ Nm} \quad (9.30)$$

Hodnoty kroutících momentů pro frézování hrubování a pro vrtání jsou následující:

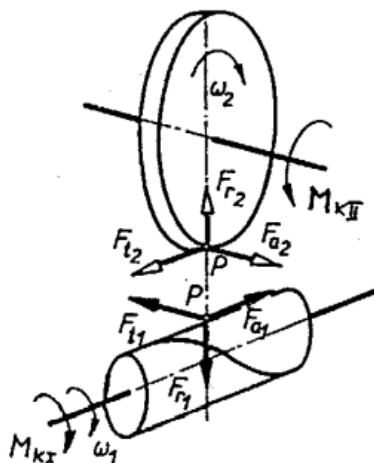
$$M_{\max_h} = 140,12 \text{ Nm} \quad (9.31)$$

$$M_{\max_v} = 291,76 \text{ Nm} \quad (9.32)$$

Hodnota M_{bmax} je větší než M_{\max_h} a M_{\max_v} . Brzdný moment vyvinutý pneumatickou brzdou a šnekovou převodovkou je tedy dostačující.

9.3.5. Silové poměry šnekového převodu

V následující kapitole budou vyjádřeny silové poměry na šnekovém převodu. Výsledky těchto výpočtů budou dále zahrnuty pro kontrolu zvoleného ložiska.



Obr. 9.8 - Silové poměry šnekového převodu [54]

Parametry šnekové převodovky nutné pro výpočet axiálních, radiálních a tečných sil jsou následující:

- Stoupání šroubovice šnekové hřídele γ

$$\gamma = 2,0605^\circ \quad (9.33)$$

- Úhel profilu α_h

$$\alpha_h = 15^\circ \quad (9.34)$$

- Osová vzdálenost šnekového převodu a

$$a = 75 \text{ mm} \quad (9.35)$$

- Průměr roztečné kružnice šnekové hřídele d_1

$$d_1 = 34,87 \text{ mm} \quad (9.36)$$

- Průměr roztečné kružnice šnekového kola d_2

$$d_2 = 2 \cdot \left(a - \frac{d_1}{2} \right) = 2 \cdot \left(75 - \frac{34,87}{2} \right) = 115,13 \text{ mm} \quad (9.37)$$

- Velikost třecího úhlu φ' pro kluznou rychlost $v_k = 5,6 \frac{m}{s}$

$$\begin{aligned} \varphi' &= \tan^{-1} \left(1,5 \cdot \left(0,02 + \frac{0,03}{v_k} \right) \right) \\ &= \tan^{-1} \left(1,5 \cdot \left(0,02 + \frac{0,03}{5,6} \right) \right) = 2,1782^\circ \end{aligned} \quad (9.38)$$

Síly s označením 1 jsou pro šnekovou hřídel a síly s označením 2 jsou pro šnekové kolo.

- Velikosti tečných sil

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot M_k}{d_1} = \frac{2 \cdot 6,1}{0,03487} = 349,9 \text{ N} \quad (9.39)$$

$$F_{t2} = \frac{2 \cdot M_{kII}}{d_2} = \frac{2 \cdot M_k \cdot \mu \cdot i}{d_2} = \frac{2 \cdot 6,1 \cdot 0,16 \cdot 90}{0,11513} = 1525,9 \text{ N} \quad (9.40)$$

- Velikosti axiálních sil

$$F_{a1} = \frac{F_{t1}}{\tan(\gamma + \varphi')} = \frac{349,9}{\tan(2,0605 + 2,1782)} = 4721,1 \text{ N} \quad (9.41)$$

$$\begin{aligned} F_{a2} &= F_{t2} \cdot \tan(\gamma + \varphi') = 1525,9 \cdot \tan(2,0605 + 2,1782) \\ &= 113,1 \text{ N} \end{aligned} \quad (9.42)$$

- Velikosti radiální sil

$$\begin{aligned} F_{r1} &= F_{r2} = \frac{F_{t1} \cdot \tan \alpha_h}{\sin \gamma + \cos \gamma \cdot \tan \varphi'} \\ &= \frac{349,9 \cdot \tan 15}{\sin 2,0605 + \cos 2,0605 \cdot \tan 2,1782} = 1267,6 \text{ N} \end{aligned} \quad (9.43)$$

9.3.6. Kontrolní výpočet axiálně-radiálního ložiska

V této kapitole bude ověřena životnost navrženého ložiska.

Parametry ložiska jsou následující:

- Vnější průměr ložiska D

$$D = 210 \text{ mm} \quad (9.44)$$

- Vnitřní průměr ložiska d

$$d = 120 \text{ mm} \quad (9.45)$$

- Dynamická únosnost v axiálním směru C_a

$$C_a = 80\,000 \text{ N} \quad (9.46)$$

- Dynamická únosnost v radiálním směru C_r

$$C_r = 70\,000\,N \quad (9.47)$$

- Statická únosnost v axiálním směru C_{0a}

$$C_{0a} = 445\,000\,N \quad (9.48)$$

- Statická únosnost v radiálním směru C_{0r}

$$C_{0r} = 148\,000\,N \quad (9.49)$$

- Maximální otáčky ložiska n_{max}

$$n_{max} = 230\,min^{-1} \quad (9.50)$$

- Základní výpočtová trvanlivost ložiska L_{10}

$$L_{10} = 10^6\,n^{-1} \quad (9.51)$$

- Výpočtová konstanta pro válečková ložiska a_k

$$a_k = 3,33 \quad (9.52)$$

Síly zatěžující ložisko v radiálním směru jsou síly F_{r2} od šnekového kola nebo síla od operace vrtání F_v . Síla F_v je větší a bude zohledněna ve výpočtu. Dále pak v radiálním směru působí síla od tíhy obrobku, svěráku, stolu, rotačního tělesa a šnekového kola F_{ob} .

$$F_{ob} = 688\,N \quad (9.53)$$

$$F_{r2} = 1267,6\,N \quad (9.54)$$

$$F_v = 3\,432,5\,N \quad (9.55)$$

$$F_{rad_max} = F_{ob} + F_v = 688 + 3\,432,5 = 4120,5\,N \quad (9.56)$$

Síly zatěžující ložisko v axiálním směru jsou síly F_{a2} od šnekového kola nebo síla od hrubovacího frézování F_{o_h} . Síla F_{o_h} je větší a bude zohledněna ve výpočtu.

$$F_{a2} = 113,1\,N \quad (9.57)$$

$$F_{o_h} = 1648,5\,N \quad (9.58)$$

Výpočet statické bezpečnosti v radiálním směru S_{0r}

$$S_{0r} = \frac{C_{0r}}{F_v} = \frac{148\,000}{4120,5} = 35,9 \quad (9.59)$$

Výpočet statické bezpečnosti v axiálním směru S_{0a}

$$S_{0a} = \frac{C_{0a}}{F_{o_h}} = \frac{445\,000}{1648,5} = 269,9 \quad (9.60)$$

Hodnoty statických koeficientů v obou směrech jsou vyšší než $S_{0min} = 3$, což je hodnota minimálního statického koeficientu udávaným výrobcem ložiska.

Trvanlivost ložiska v radiálním směru L_r vychází:

$$L_r = \frac{L_{10}}{n_{max} \cdot 60} \cdot \left(\frac{C_r}{F_{rad_max}} \right)^{a_k} = \frac{10^6}{230 \cdot 60} \cdot \left(\frac{70\,000}{4120,5} \right)^{3,33} \quad (9.61)$$
$$= 904\,720 \text{ hod}$$

Trvanlivost ložiska v axiálním směru L_a vychází:

$$L_a = \frac{L_{10}}{n_{max} \cdot 60} \cdot \left(\frac{C_a}{F_{oh}} \right)^{a_k} = \frac{10^6}{230 \cdot 60} \cdot \left(\frac{80\,000}{1648,5} \right)^{3,33} \quad (9.62)$$
$$= 29\,819\,775 \text{ hod}$$

Doporučená trvanlivost ložisek se udává jako $L_d = 50\,000 \text{ hod}$. V radiálním i axiálním směru trvanlivost ložisek vyhovuje.

9.3.7. Kontrola spojky

Výrobce spojky udává maximální přenášený krouticí moment M_{s_max}

$$M_{s_max} = 200 \text{ Nm} \quad (9.63)$$

Servomotor může dosáhnout maximálního kroutícího momentu M_{m_max}

$$M_{m_max} = 22,5 \text{ Nm} \quad (9.64)$$

$$M_{s_max} > M_{m_max} \quad (9.65)$$

Vybranou spojku lze použít.

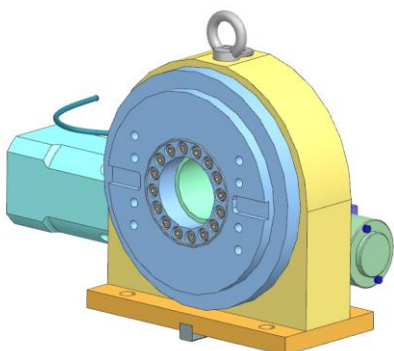
10. Závěr

V rámci této bakalářské práce byla navržena přídatná osa k 3osému obráběcímu stroji MIKRON VCE 600 Pro. Přídatná osa byla navržena s cílem urychlit výrobu součástí a zvýšit tak produktivitu na obráběcím stroji.

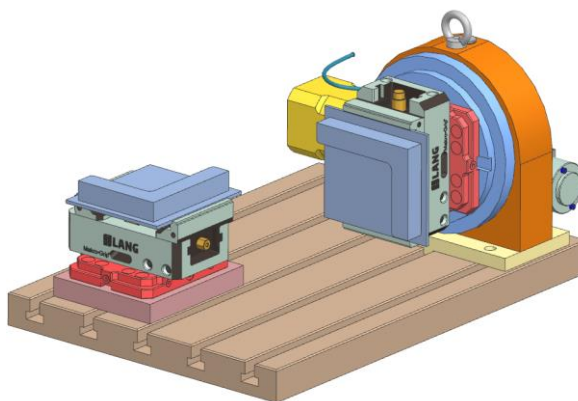
V práci byly zpracovány návrhy polohovacího zařízení s jednou i dvěma rotačními osami. Návrhy zařízení s dvěma rotačními osami se ukázaly jako nevýhodné, neboť zde docházelo k zásadním problémům, jako byla možná kolize s vřetenem, málo tuhá konstrukce, nedostatečný zástavbový prostor a celkově finanční náročnost. Byla proto zvolena varianta s jednou rotační osou, která je ekonomicky dostupnější, a díky použití upínacího systému se zajistil produktivní způsob obrábění dílců, které vyžadují obrábění z více stran.

Nedílnou součástí práce je výpočtová část, kde byl vypočten a porovnán čas polohování s časem přídatné osy od daného výrobce. Čas polohování navržené rotační osy vyšel dostatečný pro produktivní způsob výroby.

Pro zvolený návrh byla představena technologie výroby bez přídatné osy i s přídatnou osou. Porovnání těchto technologií bylo provedeno pomocí technologických postupů, ze kterých byly zjištěny výrobní časy. Díky použití přídatné osy lze zredukovat čas potřebný na výrobu jednoho dílce z původních 80 minut na 53 minut a výrobní náklady snížit o 41 %. Při uvažování výrobní kapacity 18 kusů denně by se investice vrátila do 9 pracovních týdnů. V práci byly následně shrnuty očekávané náklady podle poptaných komponent a celková cena zařízení, která je nižší než u nabízené přídatné osy. Součástí práce je příloha složená z výkresu rámu ložiska, rotačního tělesa, sestavný výkres a technologické postupy výroby s přídatnou osou a bez přídatné osy.



Obrázek 10.1 - Přídatná osa



Obr. 10.2 - Přídatná osa v prostoru obráběcího stroje MIKRON VCE 600 Pro

Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] *Aktuálně.cz - ekonomika* [online]. ECONOMIA, ed. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/ceska-prace-prudce-zdrazuje-presto-zustava-devata-nejlevnejs/r~24df1faebdc211e890ecac1f6b220ee8/>
- [2] *Čas práce, pracnost, produktivita* [online]. MORAVSKÁ VYSOKÁ ŠKOLA OLOMOUČ, ed. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://is.mvso.cz/el/mvso/zima2021/XMVYR/243008/2._prednaska.pdf?lang=en
- [3] GF MACHINING SOLUTIONS [online]. *Mikron VCE Pro*. 2020 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: https://www.gfms.com/content/dam/gfms/pdf/milling/3-axis-milling/vce/en/mikron-vce-600-800-800w-1000-1200-1400-1600-2000-pro_en.pdf
- [4] *Strategie frézování naklopeným nástrojem* [online]. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, ed. [cit. 2021-10-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem>
- [5] PETER LEHMANN AG [online]. *CNC-Drehtische edition 4*. 2021 [cit. 2021-10-07]. Dostupné z: <https://www.lehmann-rotary-tables.com/de/pdfcollector/viewer/247228?pageNum=28>
- [6] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV* [Konstrukce CNC obráběcích strojů IV]. 4. ed. Praha: MM publishing, 2018. ISBN 9788090631083.
- [7] *Ekonomika v číslech* [online]. SVAZ PRŮMYSLU A DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, ed. [cit. 2021-10-01]. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/muze-vas-zajimat/ekonomika-v-cislech?start=10>
- [8] *CNC soustruhy* [online]. PILART 2013, ed. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/produkt/robustni-CNC-soustruh-s-pohanenymi-nastroji-AVIAturn-63M-1189/>
- [9] *Soustruhy a soustružnická centra - řada DL Y* [online]. STRÁNSKÝ A PETRŽÍK, ed. [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.sappv.cz/stroje/ffgdmc/ffgdmc-menu/dmc-dly/>

- [10] DMG MORI [online]. *NH4000 DCG*. 2021 [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/244466/pm0uk13-nh4000dcg-pdf-data.pdf
- [11] *Portálové obráběcí centrum s pojízdovým stojanem PAMA řada VERTIRAM GT* [online]. MRM MACHINERY, ed. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://mrm-machinery.cz/categories/portanova-obrabeci-centra-spodni-gantry-jezdi-stojan/>
- [12] *Multifunkční obráběcí stroje zkracují výrobní časy* [online]. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, ed. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/multifunkcni-obrabeci-stroje-zkracuji-vyrobní-casy>
- [13] *5-AXIS MACHINING* [online]. FANUC AMERICA CORPORATION, ed. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/solutions/applications/5-axis-cnc-machining>
- [14] *MULTICUT 630* [online]. KOVOSVIT MAS, ed. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.com/multicut-630-p37.html>
- [15] HANZLÍK, A. *Konstrukce naklápěcího otočného stolu* [Konstrukce naklápěcího otočného stolu]. Brno: 2010. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [16] ONDŘEJ MATYÁŠ. *Rotační náhonové soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. Bakalářská práce.
- [17] FIBRO [online]. *NC ROTARY TABLES WITH WORM GEAR UNIT*. 2018 [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://www.fibro.de/fileadmin/FIBRO/EN/03_RUNDTISCHE/Downloadbereich/Kataloge_PDF/FIB_17_5030_Katalog_FIBROPLAN_Mod_EN_PV.pdf
- [18] *NST300* [online]. NIKKEN KOSAKUSHO GLOBAL, ed. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.nikken-world.co.uk/products/rotary-tables/4th-axis/nst300>
- [19] *Manual Tilt Rotary Table* [online]. CNC INDEXING, ed. [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: <https://www.cncindexing.com/tilt-rotary-tables/manual-tilting-tables/>
- [20] *TRNC Series CNC Rotary Table (5 AXIS) - Tanshing Rotary Table Manufacturer* [online]. TANSHING ACCURATE INDUSTRIAL, ed. [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <http://www.tanshing.com/TRNC-321.html#>
- [21] *ROTARY TILTING TABLE* [online]. ESPACENET, ed. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/018750262/publication/JP2002066852A?q=rotary%20tilting%20table>

- [22] *ROTARY TILTING TABLE* [online]. ESPACENET, ed. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/046832838/publication/US2012266783A1?q=rotary%20tilting%20table>
- [23] *ROTARY TILTING TABLE* [online]. ESPACENET, ed. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021700320/publication/US3657963A?q=rotary%20tilting%20table>
- [24] ŠVÁČEK, K. *Deskripce vedení u obráběcích strojů*. Brno: VUT , 2009. Bakalářská práce.
- [25] *Křížová válečková ložiska* [online]. LIN-TECH, ed. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://lin-tech.hennlich.cz/novinky/krizova-valeckova-loziska-thk.html>
- [26] ZKL Group. [9. Mazání ložisek|ZKL Group] In: *9. Mazání ložisek|ZKL Group* [online]. [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/9-mazani-lozisek>
- [27] SKF [online]. *Valivá ložiska*. 2019 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf
- [28] *Development Scout* [online]. DEVELOPER SCOUT, ed. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://cs.developmentscout.com/industrie/maschinenelemente/gleitlager-waelzlager/9336-rundtischlager-mit-50-weniger-reibmomenten-und-80-hoeheren-grenzdrehzahlen>
- [29] *Přesné polohování pomocí řemenových převodů* [online]. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM, ed. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-polohovani-pomoci-remenovych-prevodu>
- [30] Lyndex-Nikken: Nikken Rotary Tables [Why-We-Are-Uniyue - Lyndex-Nikken, Inc] In: *Why-We-Are-Uniyue - Lyndex-Nikken, Inc* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.lyndexnikken.com/Why-We-Are-Unique>
- [31] BOLEK, A. a KOCHMAN, J. *Části strojů* [Části strojů]. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990.
- [32] HORÁK, T. *Návrh jednoosé frézovací hlavy s elektrovřetenem*. Praha: ČVUT, 2017. Bakalářská práce. Ústav výrobních strojů a zařízení.

- [33] OTT. *OTT - Worm Gears*. 2021 [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: https://www.zahnrad-ott.de/wp-content/uploads/2020/09/download_catalogue-type-g1-en_ott-gears.pdf
- [34] *Harmonic Drive* [online]. HARMONIC DRIVE LLC, ed. [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology/harmonicdrive>
- [35] *Horizontální vyvrtávačky - příslušenství* [online]. RETOS VARNSDORF S.R.O, ed. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.retos.cz/rt05>
- [36] KOVOSVIT MAS [online]. *Svět obráběcích strojů*. 2010 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6716698-Svet-obrabecich-stroju-design-manual-kovosvit-mas-a-s.html>
- [37] *Servomotory* [online]. SEW-EURODRIVE, ed. [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: https://www.sew-eurodrive.cz/vyrobky/motory/servomotory/servomotoren_3.html#bild_video_text_kombination
- [38] SOUČEK, P. *Servomechanismy ve výrobních strojích* [Servomechanismy ve výrobních strojích]. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [39] *AC SERVO MOTORS* [online]. MAVILOR MOTORS S.A. ed. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <http://mavilor.es/products/xtraforsprime/>
- [40] *Torque motors TM-2* [online]. HIWIN, ed. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.hiwin.de/en/Products/Torque-motors/Torque-motors-TM-2/c/5055>
- [41] TG DRIVES [online]. *Momentové motory*. 2019 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.tgdrives.cz/fileadmin/user_upload/download/TGQ_katalog_CZ_2019.pdf
- [42] *Přesnost polohování rotačních os* [online]. HEIDENHAIN, ed. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/Positioniergenauigkeit_Rundachsen_en_EMO.pdf
- [43] HOUŠA, J. *Konstrukce číslicově řízených obráběcích strojů* [Konstrukce číslicově řízených obráběcích strojů]. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [44] *Rotační snímače* [online]. IFM ELECTRONIC, SPOL. S R.O. , ed. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://closetoyou.cz/homepage-produktovehowebu-ifm-electronic-2018/encodery/>

- [45] *How Servo Motors Work* [online]. KOLLMORGEN, ed. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: https://www.kollmorgen.com/en-us/blogs/_blog-in-motion/articles/how-servo-motors-work/
- [46] HEMA GROUP|HEMA Group. [RotoClamp|HEMA Group] In: *RotoClamp|HEMA Group* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.hema-group.com/en/products/clamping-systems/rotoclamp/>
- [47] HEMA [online]. *Clamping Systems*. 2018 [cit. 2021-10-05]. Dostupné z: https://www.hema-group.com/fileadmin/user_upload/05_service/05_downloads/kataloge/HEMA_Clamping_Systems.pdf
- [48] *Clamping Sleeves Engineered to Support Machine Tool Workholding* [online]. FABRICATING & METALWORKING , ed. [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/06/clamping-sleeves-engineered-support-machine-tools/>
- [49] *Řezná síla* [online]. ELUC, ed. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1279>
- [50] ČERNOCH, S. *Strojně technická příručka 2*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968. 04-224-77.
- [51] KTR CR [online]. *Drive technology*. 2022 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: https://www.ktr.com/catalog/index.php?catalog=DriveTechnology#page_318
- [52] NODES [online]. HONG KONG NODES TECHNOLOGY CO. LTD. ed. [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.nodeshk.com/ina/art/yrt-yrtc-yrts-zkldf.html>
- [53] LANG TECHNIK [online]. *20220209_lang_katalog_DE*. 2021 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <https://indd.adobe.com/view/8f606670-9280-4572-8a53-70b113b717a4>
- [54] KUGL, O. HOUKAL, J. TOMEK, P. a ZÝMA, J. *Projekt - III. ročník..* ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01638-2.
- [55] *Pětiosá obráběcí centra – řada MF – U* [online]. MACH TRADE, S.R.O. ed. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.machtrade.cz/frezovani/quaser/petioka-obrabeci-centra-rada-mf/>
- [56] *WRFT 130 CNC* [online]. STROJIMPORT, ed. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.strojimport.cz/maschinen/wrft-130-cnc/>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 - 3osá vertikální frézka Mikron VCE 600 Pro [3]	13
Obr. 3.1 – CNC soustruh AVIAturn 63M [8]	14
Obr. 3.2 – CNC soustruh DMC řady DL Y doplněný o osu Y [9].....	15
Obr. 3.3 – stroj DMG Mori NH4000 DCG [8].....	16
Obr. 3.4 – stroj TOSHULIN WRFT 130 [9].....	16
Obr. 3.5 – stroj Quaser MF 630U [10].....	16
Obr. 3.6 – stroj MRM Machinery UNIPORT4000 [11].....	16
Obr. 3.7 – Obrábění ozubeného věnce na multifunkčním stroji [13]	17
Obr. 3.8 – Multifunkční obráběcí centrum MAS MULTICUT 630 [14]	17
Obr. 3.9 – Označení os CNC stroje [16].....	18
Obr. 3.10 – Přídavný stůl Lehmann EA-520 [5]	19
Obr. 3.11 – Přídavný stůl FIBROPLAN NC 1.03 [17]	19
Obr. 3.12 – Otočně sklopný stůl Nikken NST 300 [18].....	20
Obr. 3.13 – Otočně sklopný stůl TJR MTHR(s) 255 [19]	20
Obr. 3.14 - Otočně sklopný stůl značky Lehmann [5]	20
Obr. 3.15 - Kombinované uložení značky TANSHING [20]	20
Obr. 3.16 – Kolébková konstrukce [21]	21
Obr. 3.17 – Náhon osy C pomocí dvojice řemenových převodů a ozubení [22]	21
Obr. 3.18 – Náhon osy C pomocí kuželového soukolí [22]	21
Obr. 3.19 – Řez osou otočně sklopného stolu [23].....	22
Obr. 3.20 – Křížové válečkové ložisko firmy THK [25].....	24
Obr. 3.21 – Válečkové ložisko řady YRTC firmy FAG [28].....	24
Obr. 3.22 – Pohon polohovacího stolu svařovací linky [29]	24
Obr. 3.23 – Globoidní tvar šnekového kola a válcový tvar šnekové hřídele [30]	24
Obr. 3.24 – Dělený šnek firmy OTT [33].....	25
Obr. 3.25 – Vymezení vůle děleným šnekem firmy OTT [33]	26
Obr. 3.26 – Generátor vln spolu s pružným a oběžným kolem [34]	26
Obr. 3.27 – Princip funkce harmonické převodovky [34]	26
Obr. 3.28 – Dvojice pastorků na otočném stole RT05 [35]	27
Obr. 3.29 – Použití prstencových motorů na stroji MCU 360 od firmy MAS [36]	27
Obr. 3.30 – Servomotor značky Mavilor [39].....	27
Obr. 3.31 – Prstencový motor značky HIWIN [40]	27
Obr. 3.32 – Přímé odměřování polohy [42]	28

Obr. 3.33 – Nepřímé odměřování polohy [42]	28
Obr. 3.34 – Zpětnovazební řízení servomotoru [45]	29
Obr. 3.35 – Pneumatická brzda značky HEMA [47]	30
Obr. 3.36 – Hydraulická brzda značky KOSTYRKA [48]	30
Obr. 4.1 - 3osá vertikální frézka Mikron VCE 600 Pro s přídavnou 4. osou [3].....	32
Obr. 4.2 – Maximální rozměry obrobku.....	32
Obr. 4.3 – Obrobek s tolerovanými otvory	33
Obr. 4.4 – Rotační osa C.....	33
Obr. 5.1 – Nulová poloha natočení osy B	37
Obr. 5.2 – Pohled ze směru obsluhy	37
Obr. 5.3 – 1. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Y..	37
Obr. 5.4 – 1. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Y..	37
Obr. 5.5 – 2. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Z..	38
Obr. 5.6 – 2. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem rovnoběžně s osou Z..	38
Obr. 5.7 – Nulová poloha natočení osy B	38
Obr. 5.8 – Pohled ze směru obsluhy	38
Obr. 5.9 – 3. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem v ose B.....	39
Obr. 5.10 – 3. varianta - provedení dvou rotačních os s pohonem v ose B.....	39
Obr. 5.11 – Nulová poloha natočení osy B	39
Obr. 5.12 – Vzdálenost os B a C a vzdálenost hrany obrobku od osy B.....	39
Obr. 5.13 – 4. varianta - provedení jedné rotační osy	40
Obr. 5.14 – 4. varianta – pozice dvou upnutých dílců	40
Obr. 5.15 – 4. varianta rotační osy a její ustavení na pracovní stůl	40
Obr. 5.16 – 5. varianta - provedení jedné rotační osy	41
Obr. 5.17 – 5. varianta – pozice dvou upnutých dílců	41
Obr. 5.18 – 5. varianta rotační osy a její ustavení na pracovní stůl	41
Obr. 6.1 – Přídavná rotační osa	43
Obr. 6.2 – Přídavná rotační osa	43
Obr. 6.3 – Zobrazení šroubových spojů a komponent.....	43
Obr. 6.4 – Zobrazení šnekového hřídele.....	44
Obr. 6.5 – Šneková převodovka OTT [33]	44
Obr. 6.6 – Bezvůlová ohybově a torzně tuhá spojka KTR700 [51]	45
Obr. 6.7 – Axiálně - radiální ložisko INA YRTC120XL [52].....	45
Obr. 6.8 – Montáž pneumatické brzdy HEMA [47].....	46

Obr. 8.1 – Kabel silový, kabel odměřování a hadice pro stlačený vzduch [5]	47
Obr. 8.2 – Instalace konektorů na stěnu ve vnitřním obráběcím prostoru stroje [5]	47
Obr. 9.1 – Dílec – pohled zepředu	48
Obr. 9.2 – Dílec – pohled zleva	48
Obr. 9.3 – Dílec – pohled shora	48
Obr. 9.4 – Dílec 3D pohled	48
Obr. 9.5- Upínací deska systému „QUICK POINT“ firmy LANG TECHNIK [43]	50
Obr. 9.6 - Svěrák firmy LANG TECHNIK s ustavovacími čepy [53]	50
Obr. 9.7 - Doba nutná pro otočení osy o 90° [5]	55
Obr. 9.8 - Silové poměry šnekového převodu [54]	57
Obr. 10.1 - Přídavná osa	61
Obr. 10.2 - Přídavná osa v prostoru obráběcího stroje MIKRON VCE 600 Pro	61

Seznam tabulek

Tab. 1 – Porovnání parametrů otočných a otočně sklopných stolů	19
Tab. 2 – Hodnoty sil působících od jednotlivých vrtáků [50]	35
Tab. 3 – Hodnoty působících sil a kroutících momentů	36
Tab. 4 – Použité komponenty variantu 1	37
Tab. 5 – Použité komponenty variantu 2	38
Tab. 6 – Použité komponenty variantu 3	39
Tab. 7 – Použité komponenty variantu 4	40
Tab. 8 – Použité komponenty variantu 5	41
Tab. 9 – Přiřazené body k jednotlivým variantám podle kritérií	42
Tab. 10 - Náklady na výrobu a ušetřené náklady podle počtu kusů	52
Tab. 11 - Náklady na pořízení přídavné osy	53
Tab. 12 – Momenty setrvačností rotujících součástí	54

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

PRIDAVNA_OSA	Sestava	0000-0010
RAM_LOZISKA	Výrobní výkres	0010-0010
ROTACNI_TELESO	Výrobní výkres	0020-0010

Elektronické přílohy (paměťová karta)

Textová část – BP-0279.pdf

Výkresová dokumentace (.pdf)


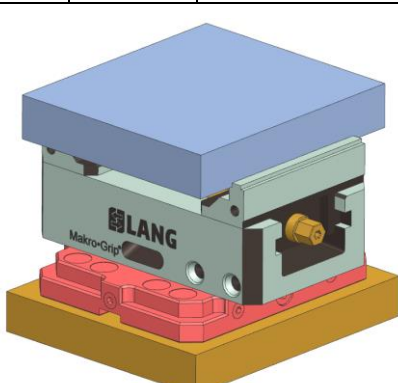
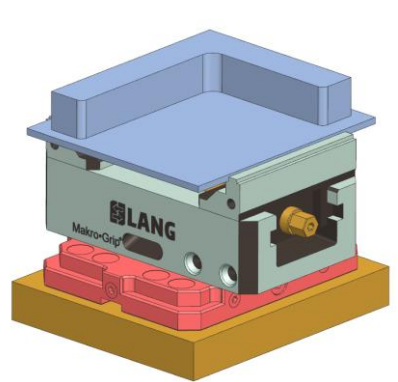
Model přídatné osy (3D) – BP-0279.stp

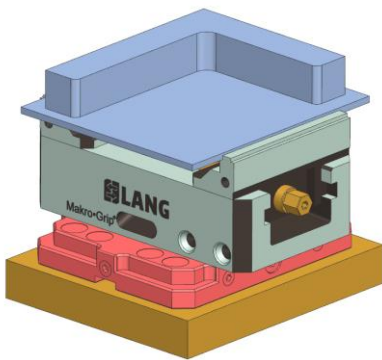
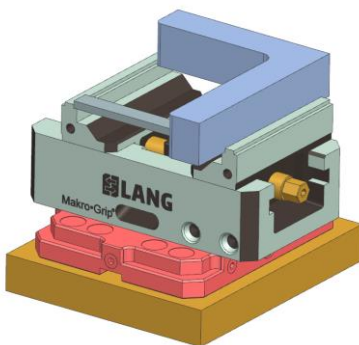
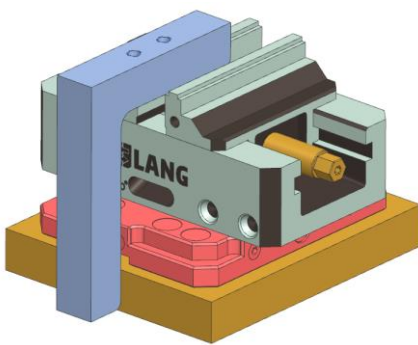
Textové přílohy

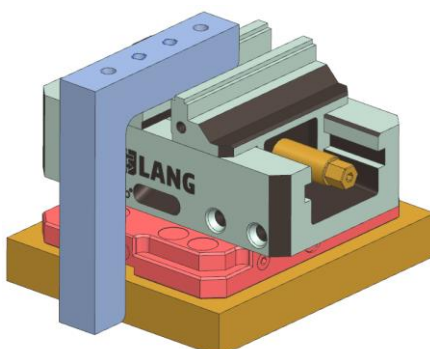
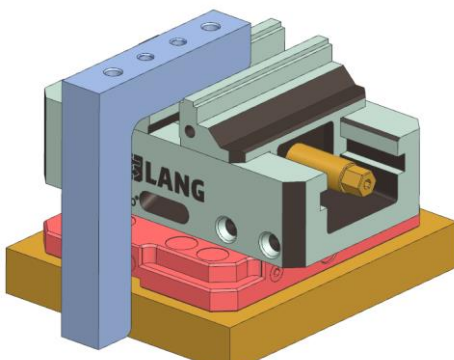
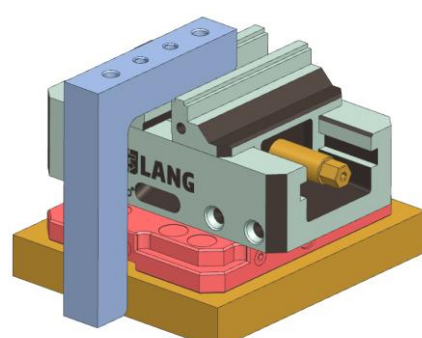
Technologický postup výroby bez přídatné osy

Technologický postup výroby s přídatnou osou

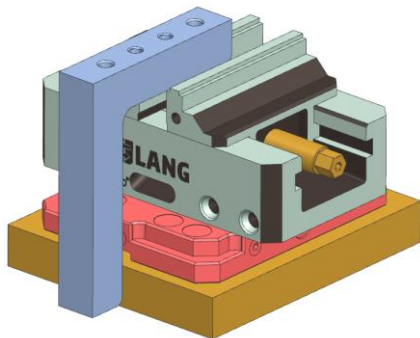
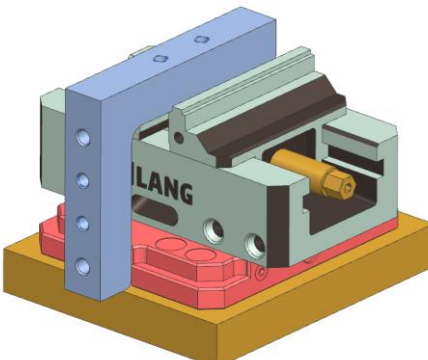
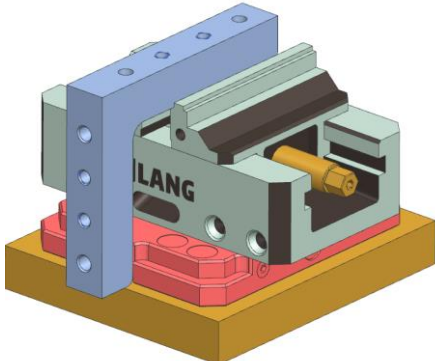
Technologický postup výroby bez přídavné osy

Operace	10	Název	Stroj	
Úsek	10.1.	Dělení materiálu na pásové pile	Bomar Ergonomic DG	
Úkon	10.1.1.			
			HRS_1 [Kč/hod] 400	
			Čas úseku $t_{10.1.}$ 3,1 min	Čas úkonu $t_{10.1.1.}$ 2,5 min
Operace	20	Název	Stroj	
Úsek	20.1.	Čelní frézování	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon	20.1.1.			
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{20.1.}$ 3 min	Čas úkonu $t_{20.1.1.}$ 2,5 min
			Nástroj Čelní dokončovací fréza s VBD	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 200	
			Posuv na zub f_z [mm] 0,1	
Operace	20	Název	Stroj	
Úsek	20.2.	Hrubování obrysu	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{20.2.}$ 5 min	
			Nástroj Rychloposuvová fréza s VBD	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 170	
			Posuv na zub f_z [mm] 0,4	

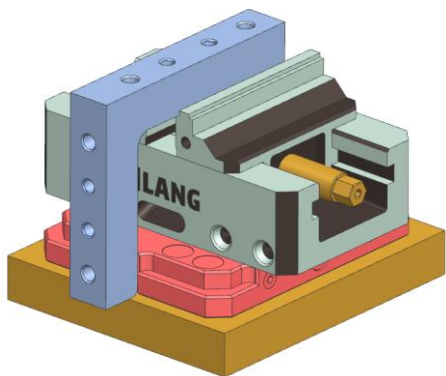
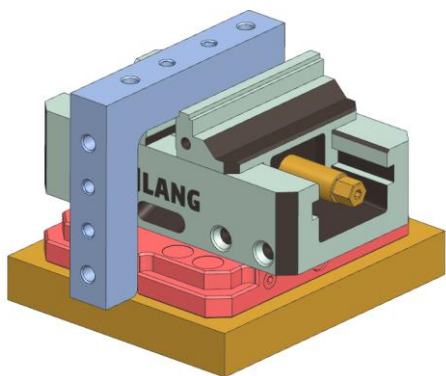
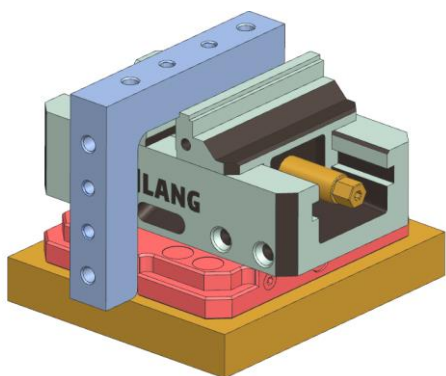
Operace	20	Název	Stroj		
Úsek	20.3.	Dokončení obrysu	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro		
Úkon			600 Pro		
			HRS_2 [Kč/hod]		
			1000		
			Čas úseku $t_{20.3.}$		
			1 min		
			Nástroj		
			Monolitická dokončovací fréza		
			Řezná rychlost v_c [m/min]		
			200		
			Posuv na zub f_z [mm]		
			0,08		
Operace	30	Název	Stroj		
Úsek	30.1.	Čelní frézování	Frézka univerzální EMCO FB 5		
Úkon	30.1.1.				
			HRS_3 [Kč/hod]		
			600		
			Čas úseku $t_{30.1.}$	Čas úkonu $t_{30.1.1.}$	
			15 min		10 min
			Nástroj		
			Čelní dokončovací fréza s VBD		
			Řezná rychlost v_c [m/min]		
			200		
			Posuv na zub f_z [mm]		
			0,1		
Operace	40	Název	Stroj		
Úsek	40.1.	Vrtání děr pro M10	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro		
Úkon	40.1.1.		600 Pro		
			HRS_2 [Kč/hod]		
			1000		
			Čas úseku $t_{40.1.}$	Čas úkonu $t_{40.1.1.}$	
			1,1 min		10 min
			Nástroj		
			Vrták SK průměr 9,3 mm		
			Řezná rychlost v_c [m/min]		
			70		
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm]		
			0,05		

Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.2.	Vrtání děr pro 10 H7	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{40.2.}$ 1,1 min	
			Nástroj Vrták SK průměr 9,8 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.3.	Sražení hran po vrtání	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{40.3.}$ 0,3 min	
			Nástroj Srážecí fréza SK	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.4.	Závitování M10	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{40.4.}$ 0,5 min	
			Nástroj Závitník tvářecí M10	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 10	


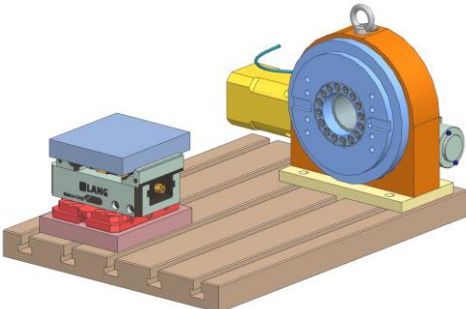
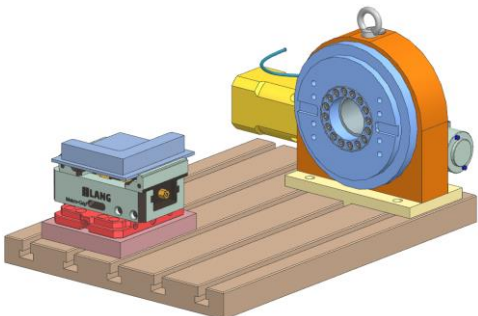


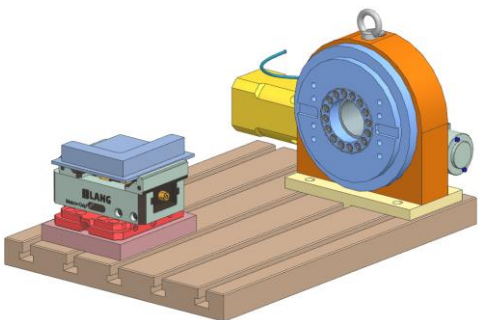
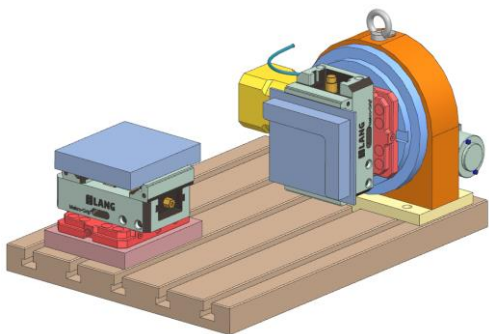
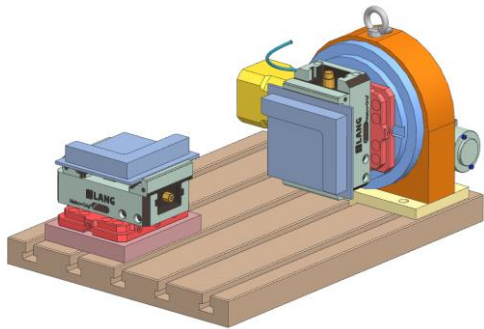
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.5.	Vystružování 10 H7	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon			600 Pro	
			HRS_2 [Kč/hod]	
			1000	
			Čas úseku $t_{40.5.}$	
			0,9 min	
			Nástroj	
			Výstružník 10 H7	
			Řezná rychlost v_c [m/min]	
			10	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	
			0,01	
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.6.	Vrtání děr pro M10	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon	40.6.1.		600 Pro	
			HRS_2 [Kč/hod]	
			1000	
			Čas úseku $t_{40.6.}$	Čas úkonu $t_{40.6.1.}$
			1,1 min	10 min
			Nástroj	
			Vrták SK průměr 9,3 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min]	
			70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	
			0,05	
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.7.	Vrtání děr pro 10 H7	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon			600 Pro	
			HRS_2 [Kč/hod]	
			1000	
			Čas úseku $t_{40.7.}$	
			1,1 min	
			Nástroj	
			Vrták SK průměr 9,8 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min]	
			70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	
			0,05	

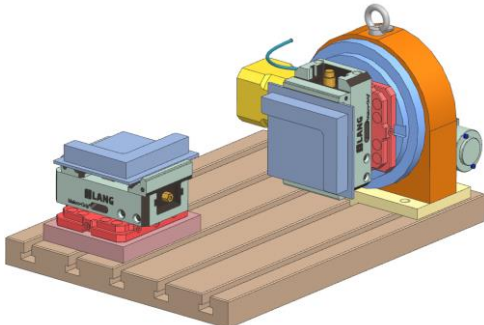
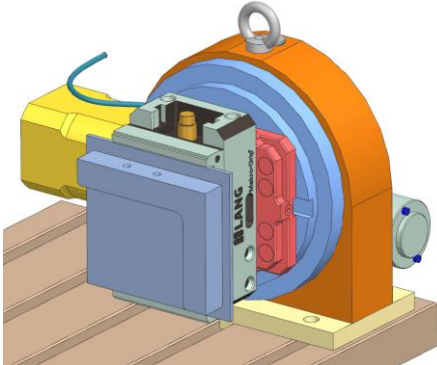
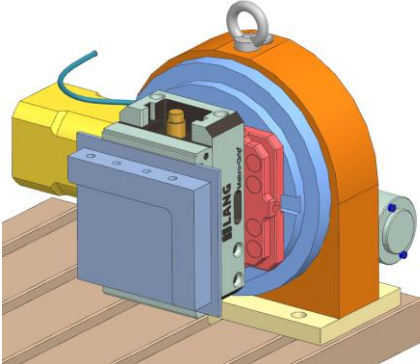


Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.8.	Sražení hran po vrtání	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon			HRS ₂ [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku t _{40.8.} 0,3 min	
			Nástroj Srážecí fréza SK	
			Řezná rychlost v _c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f _{ot} [mm] 0,05	
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.9.	Závitování M10	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon			HRS ₂ [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku t _{40.9.} 0,5 min	
			Nástroj Závitník tvářecí M10	
			Řezná rychlost v _c [m/min] 10	
Operace	40	Název	Stroj	
Úsek	40.10.	Vystružování 10 H7	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon	40.10.1.		HRS ₂ [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku t _{40.10.} 0,9 min	Čas úkonu t _{40.10.1.} 10 min
			Nástroj Výstružník 10 H7	
			Řezná rychlost v _c [m/min] 10	
			Posuv na otáčku f _{ot} [mm] 0,01	

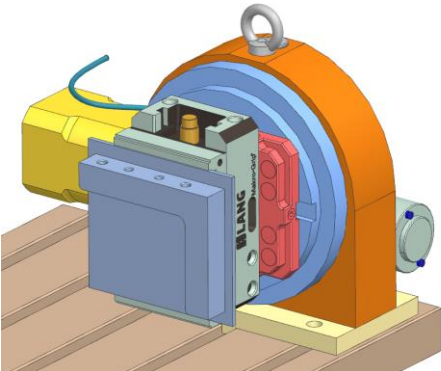
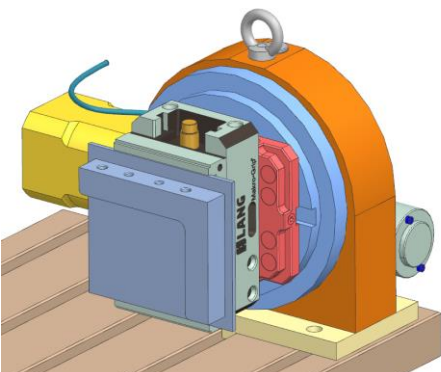
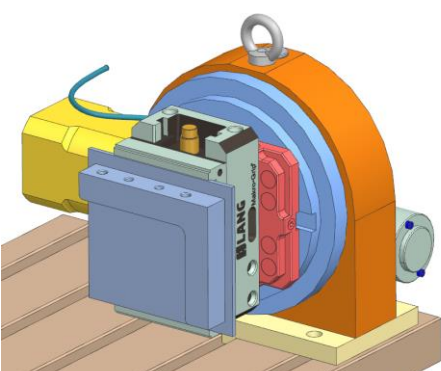
Technologický postup výroby s přídatnou osou

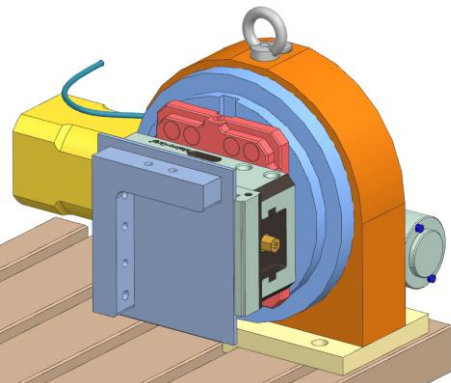
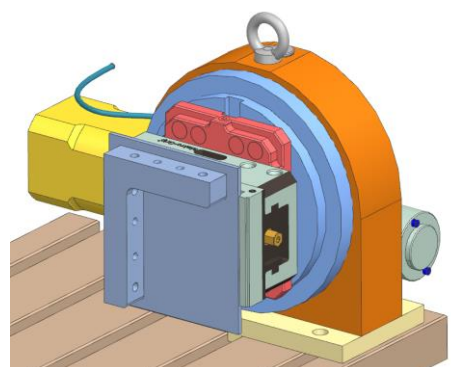
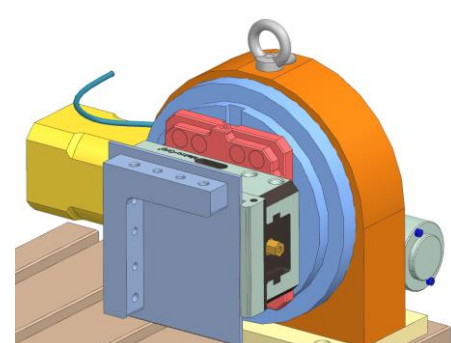
Operace	50	Název	Stroj	
Úsek	50.1.	Dělení materiálu na pásové pile	Bomar Ergonomic DG	
Úkon	50.1.1.			
			HRS_1 [Kč/hod] 400	
			Čas úseku $t_{50.1.}$ 3,1 min	Čas úkonu $t_{50.1.1.}$ 2,5 min
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.1.	Čelní frézování dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon	60.1.1.			
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.1.}$ 3 min	Čas úkonu $t_{60.1.1.}$ 2,5 min
			Nástroj Čelní dokončovací fréza s VBD	
			Řzná rychlost v_c [m/min] 200	
			Posuv na zub f_z [mm] 0,1	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.2.	Hrubování obrysu dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.2.}$ 5 min	
			Nástroj Rychloposuvová fréza s VBD	
			Řzná rychlost v_c [m/min] 170	
			Posuv na zub f_z [mm] 0,4	

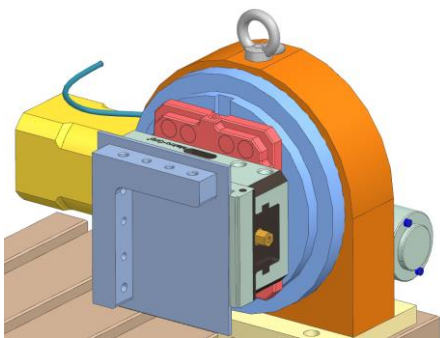
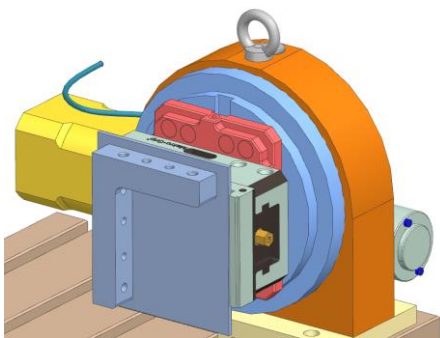
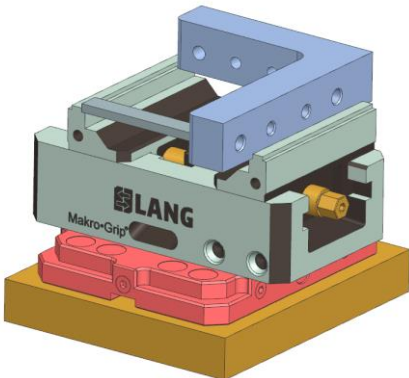
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.3.	Dokončení obrysu dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon			HRS ₂ [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku t _{60.3.} 1 min	
		Nástroj Monolitická dokončovací fréza		
		Řezná rychlost v _c [m/min] 200		
		Posuv na zub f _z [mm] 0,08		
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.4.	Čelní frézování dílce K	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon	60.4.1		HRS ₂ [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku t _{60.4.} 3 min	Čas úkonu t _{60.4.1.} 4 min
		Nástroj Čelní dokončovací fréza s VBD		
		Řezná rychlost v _c [m/min] 200		
		Posuv na zub f _z [mm] 0,1		
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.5.	Hrubování obrysu dílce K	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon			HRS ₂ [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku t _{60.5.} 5 min	
		Nástroj Rychloposuvová fréza s VBD		
		Řezná rychlost v _c [m/min] 170		
		Posuv na zub f _z [mm] 0,4		

Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.6.	Dokončení obrysu dílce K	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.6.}$ 1 min	
			Nástroj Monolitická dokončovací fréza	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 200	
			Posuv na zub f_z [mm] 0,08	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.7.	Vrtání děr M10 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.7.}$ 1,1 min	
			Nástroj Vrták SK průměr 9,3 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.8.	Vrtání děr pro 10 H7 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.8.}$ 1,1 min	
			Nástroj Vrták SK průměr 9,8 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	



Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.9.	Sražení hran po vrtání dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.9.}$ 0,3 min	
			Nástroj Srážecí fréza SK	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.10.	Závitování M10 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.10.}$ 0,5 min	
			Nástroj Závitník tvářecí M10	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 10	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.11.	Vystružování 10 H7 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.11.}$ 0,9 min	
			Nástroj Výstružník 10 H7	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 10	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,01	

Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.12.	Vrtání děr M10 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.12.}$ 1,1 min	
			Nástroj Vrták SK průměr 9,3 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.13.	Vrtání děr pro 10 H7 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.13.}$ 1,1 min	
			Nástroj Vrták SK průměr 9,8 mm	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.14.	Sražení hran po vrtání dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.14.}$ 0,3 min	
			Nástroj Srážecí fréza SK	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 70	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,05	

Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.15.	Závitování M10 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon				
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.15.}$ 0,5 min	
			Nástroj Závitník tvářecí M10	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 10	
Operace	60	Název	Stroj	
Úsek	60.16.	Vystružování 10 H7 dílce J	Vertikální frézovací centrum Mikron VCE 600 Pro	
Úkon	60.16.1			
			HRS_2 [Kč/hod] 1000	
			Čas úseku $t_{60.16.}$ 0,9 min	Čas úkonu $t_{60.16.1.}$ 2 min
			Nástroj Výstružník 10 H7	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 10	
			Posuv na otáčku f_{ot} [mm] 0,01	
Operace	70	Název	Stroj	
Úsek	70.1.	Čelní frézování dílce J	Frézka univerzální EMCO FB 5	
Úkon	70.1.1			
			HRS_3 [Kč/hod] 600	
			Čas úseku $t_{70.1.}$ 15 min	Čas úkonu $t_{70.1.1.}$ 10 min
			Nástroj Čelní dokončovací fréza s VBD	
			Řezná rychlost v_c [m/min] 200	
			Posuv na zub f_z [mm] 0,1	