

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba výrobních strojů a zařízení

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

5-ti osé obráběcí centrum s maximálním průměrem stolu nebo  
obrobku 1200 - 1500 mm

Autor: **Bc. Štěpán Heller**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, kteří přispěli radami a připomínkami při tvorbě mé diplomové práce, zejména pak panu Doc. Ing. Zdeňkovi Hudcovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce. Neméně velké poděkování patří také mé rodině a blízkému okolí za aktivní podporu při studiu.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Heller	Jméno Štěpán		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 - Stavba výrobních strojů a zařízení			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing Hudec, CSc.	Jméno Zdeněk		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>		Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	5-ti osé obráběcí centrum s maximálním průměrem stolu nebo obrobku 1200 - 1500 mm			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	60	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	37	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	23
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce obsahuje posouzení použití strojů se stolem naklápěcím a otočným a strojů se stolem pouze otočným doplněných frézovací hlavou. Dále pak návrh nové koncepce stroje a jeho hodnocení v závislosti na hmotnostech pohyblivých částí, dynamické stabilitě, celkové hmotnosti a dědičnosti konstrukce.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">pětiosé obráběcí centrum, otočný stůl, frézovací hlava, rám stroje, frézování, soustružení</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Heller	Name Štěpán	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 - Design of Manufacturing Machines and Equipment		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Hudec, CSc.	Name Zdeněk	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	5-axes Machining Centre with Max. Diameter of the Workpiece or Table of 1200 - 1500 mm		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	60	<b>TEXT PART</b>	37	<b>GRAPHICAL PART</b>	23
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The thesis includes an assessment of machines with 2-axis rotary tables and machines with rotary tables and milling head. The new concept machine is designed. Variants of new concept are compared. Base of the comparing are dynamic stability, weight of moving parts, general weight, use of original parts.
<b>KEY WORDS</b>	five-axis centres, rotary tables, milling head, machine frame, milling, turning

# Obsah

1	Přehled použitých zkratk a symbolů.....	7
2	Úvod.....	8
2.1	Téma diplomové práce .....	8
2.2	Kovosvit MAS.....	8
2.3	Moderní obráběcí stroje.....	8
3	Obráběcí centra s řízením pěti os .....	9
3.1	Obráběcí centrum MAS MCU 630.....	10
3.2	Obráběcí centrum MAS MCV 1000 5AX.....	11
3.3	Obráběcí centrum DMG DMU eVo 100 .....	12
3.4	Obráběcí centrum DMG DMU 100 P duoBlock® .....	13
3.5	Srovnání parametrů jednotlivých strojů .....	14
3.6	Porovnání stroje MCU 630 a DMU 100 P duoBlock® .....	17
3.6.1	Maximální dosažitelné parametry strojů .....	21
4	Nové koncepce řešení stroje s portálovým rámem.....	22
4.1	Charakteristické parametry nové koncepce stroje .....	22
4.2	Navržené varianty řešení .....	22
4.2.1	Úpravy původního řešení .....	22
4.2.2	Tvorba nové koncepce .....	27
4.2.3	Varianta I.....	31
4.2.4	Varianta II .....	35
4.3	Hodnocení a výběr optimální varianty .....	38
4.3.1	Hmotnost pohyblivých částí.....	38
4.3.2	Dynamická stabilita rámu.....	40
4.3.3	Zachování původních částí.....	43
4.3.4	Celková hmotnost stroje.....	43
4.3.5	Celkové hodnocení variant.....	45
5	Kontrola desky pro pracovní stůl .....	47
5.1	Výpočet sil při stavu 1 .....	49
5.2	Výpočet sil při stavu 2 .....	50
5.3	Výpočet deformací desky pomocí MKP .....	50
5.3.1	Výpočtový 3D model .....	50
5.3.2	Vyhodnocení zjištěných úhlů naklonění .....	54
6	Technickoekonomické hodnocení .....	55
6.1	Technické hodnocení .....	55
6.2	Ekonomické hodnocení .....	55
7	Závěr.....	58
	Použitá literatura .....	59
	Seznam obrázků .....	59
	Seznam tabulek .....	61

## 1 Přehled použitých zkratk a symbolů

X, Y, Z, A, B, C	označení os na obráběcím stroji
e [mm]	excentricita
H, L, x, y, z [mm]	délkové rozměry
D [mm]	průměr
r [mm]	poloměr
Q [kg]	hmotnost, zatížení
F [N]	síla
M [Nm]	moment síly
$\kappa, \delta, \varphi$ [rad, °]	označení úhlů
$\sigma, \rho$	označení rovin

## 2 Úvod

### 2.1 Téma diplomové práce

Téma této diplomové práce od společnosti Kovosvit MAS je návrh pětiosého frézovacího stroje, pro frézování obrobků do velikosti průměru 1500mm. Společnost takto velký stroj zatím nevyrábí. Nejblíže takovému stroji z produkce společnosti je frézovací pětiosé obráběcí centrum MCU 630 nebo stroj MCV 1000 5AX. Další stroje, které jsou v této práci uvedeny, jsou stroje od firmy DMG. Tato firma je konkurencí společnosti Kovosvit MAS a ve svém sortimentu již má několik strojů s parametry, kterých by mělo být dosaženo na novém konceptu stroje, který je navržen v této práci.

Dalším úkolem je vyhodnotit, pro které stroje je výhodné použití naklápěcího otočného stolu nebo pouze otočného stolu v kombinaci s frézovací hlavou. Toto hodnocení je zaměřeno především na velikosti obráběných obrobků a jejich hmotnost.

### 2.2 Kovosvit MAS

Firma MAS byla založena roku 1939. V Sezimově Ústí začala výstavba výrobních hal, kancelářských prostor i domků pro zaměstnance. Pracovníků bylo dostatek a fabrika rostla velmi rychlým tempem. Společnost zahrnovala téměř od počátku nejen slévárnu a strojírenské dílny, ale také školní dílny a společenský dům. Nejdříve byli stroje nesoucí značku MAS výhradně pro výrobu obuvi Baťovými závody. Postupem času byly stroje prodávány i do dalších oblastí průmyslu a tento prodej se stal nakonec hlavní aktivitou závodu. Prvními produkovánými stroji byly radiální vrtačky a revolverové soustruhy. V poválečných letech se vyráběný sortiment rozšiřoval. [1]

Dnes společnost vyrábí moderní obráběcí stroje na světové úrovni, které jsou vždy přizpůsobeny požadavkům zákazníka. Jedná se především o vrtací a frézovací stroje, soustružnické stroje a multifunkční soustružnicko-frézovací stroje.

### 2.3 Moderní obráběcí stroje

Z důvodu stále se zvyšujících požadavků zákazníka, se zvyšují nároky na výrobce. Aby byli zákazníci uspokojeni, je nutné dosahovat stále větších výkonů všech, kteří se zúčastňují na výrobě. Na výrobě se dnes velkou měrou podílejí stroje, obzvláště ve strojírenském průmyslu. Jsou na ně tedy také kladené vysoké nároky a v některých případech již není postačující jednoduchý obráběcí stroj jako soustruh nebo frézka. Pak přicházejí ke slovu obráběcí centra, na kterých je možné obrábět složité tvarové plochy, soustružit i frézovat a vše na jedno upnutí obrobku.

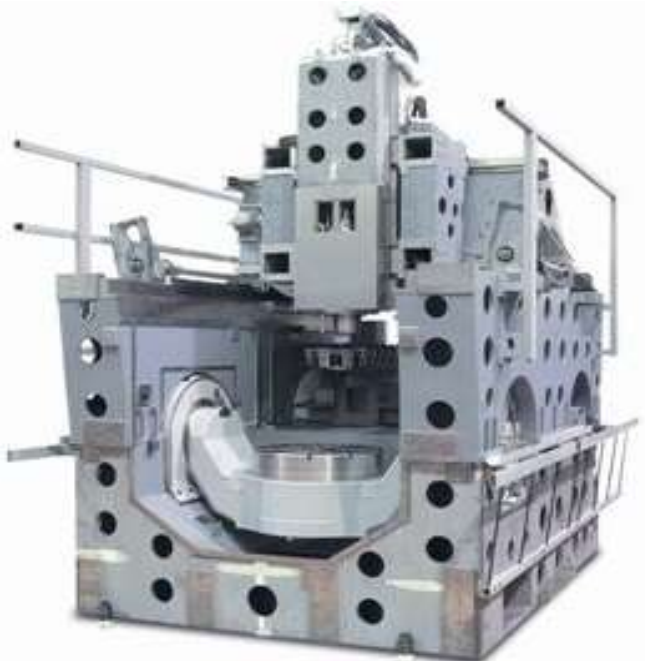
Firmy zabývající se obráběním takových to obrobků mají často velmi široký záběr prací. Stroje, které používají plní všechny jejich požadavky, protože výrobci pětiosých obráběcích center dokáží tyto stroje vyrábět modulárně a dodávají velké množství příslušenství.



### 3 Obráběcí centra s řízením pěti os

Obráběcí stroje s řízenými pěti osami mají různé konstrukční uspořádání, čímž je dosaženo požadovaných vlastností stroje. Vyrábějí se jak pro obrábění malých obrobků, například frézky pro výrobu zubních korunek, až po obrábění těžkých a rozměrných obrobků jako jsou například lisovací nástroje v automobilovém průmyslu. Jsou to tedy především velmi univerzální stroje použitelné v mnoha oblastech strojírenství. Nejčastější operací na pětiosých obráběcích centrech je obrábění složitých tvarových ploch.

Konstrukce jednotlivých strojů se liší již rámem, který může být typu portálové nebo rám do tvaru C. Tím je dáno jaké části stroje mohou být pohyblivé. Dále se konstrukční uspořádání může lišit tím, že se při konstrukci uvažuje použití kyvného stolu (kolébky), nebo pouze otočného stolu a aby bylo docíleno řízení pěti os, namontuje se na stroj otočná frézovací hlava.



Obr. 3.1 Portálový rám MCU 630 [3]



Obr. 3.2 C rám strojů řady MCV [4]

Stroje se skládají z

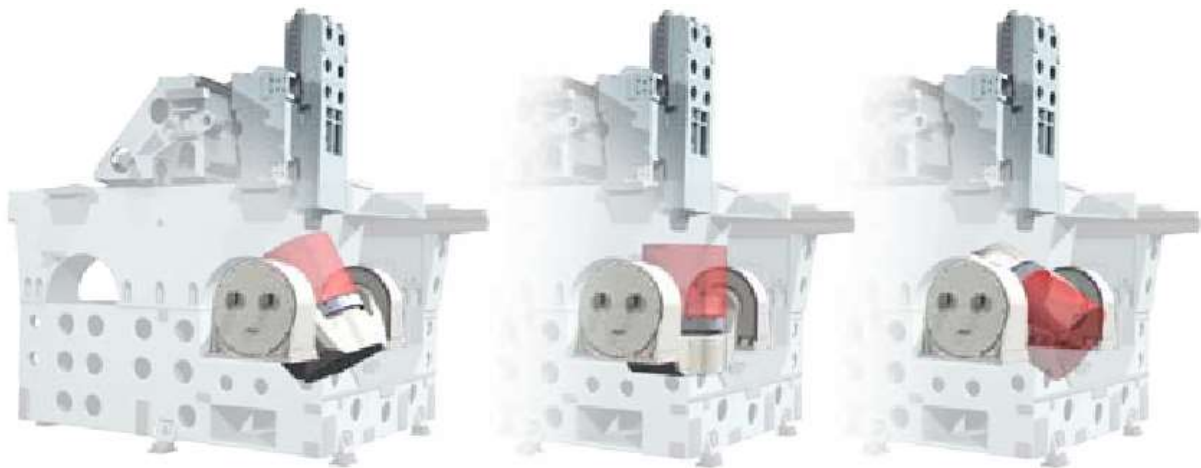
- Lože
- Stojanu
- Vřeteníku
- Vřeteno
- Pracovního stolu
- Vedení

### 3.1 Obráběcí centrum MAS MCU 630

Stroj MCU 630 je konstruován k použití pro frézovací a soustružnické operace. Je na něm možné také vrtat, vyvrtávat, vystružovat a řezat závity. Díky těmto operacím a řízení pěti os je stroj vhodný pro efektivní obrábění součástí se složitými tvary. Lze obrábět malé součásti až součásti s maximálním průměrem 1000 mm.

Stroj má vertikální portálový rám, vřeteník umístěný na smykadle a saních, které jsou na příčniku a vykonávají pohyb v osách X a Z. Pohyb v ose Y koná celý příčník. Rotační osy stroji poskytuje rotačně kyvný stůl, který je vybaven elektrickými prstencovými motory pro naklápění v ose A i pro rotační osu C. Všechny motory jsou hydraulicky brzděny, což zajišťuje spolehlivé ustavení v jakékoli dostupné poloze. Díky průtokovému chlazení motorů je docíleno teplotní stability.

Pracovní prostor stroje je přístupný z přední části stroje a při odjetí s příčником do zadní polohy také shora. Standardní zatížení stolu, by nemělo převýšit 850 kg, na zakázku lze navýšit nosnost až na 1200 kg. Je také možné volit různé varianty stolu, například pro paletový systém či čtvercový stůl.



Obr. 3.3 Možnosti naklopení pracovního stolu (-30°, 120°) [6]



Obr. 3.5 Čtvercový stůl [6]



Obr. 3.4 Stůl pro paletový systém [6]

Stroj je možný osadit několika různými vřeteny. Vřetenem může být vybaveno integrovaným pohonem pro dosažení vyšších výkonů a hydraulickou brzdou pro zajištění polohy při soustružnických operacích. Základním vybavením jsou trysky pro chlazení nástroje, avšak je možné využít i příslušenství pro středové chlazení nástroje. Nástroje jsou do vřeten usazována ze zásobníku nástrojů.

### 3.2 Obráběcí centrum MAS MCV 1000 5AX

Stroj patří do řady strojů označované MCV, jako jediný z této řady má k dispozici pět řízených os. Je proto vhodný k podobnému použití jako předchozí stroj MCU 630. Lze na něm obrábět složité tvarové plochy na výrobcích pro energetický, automobilový, letecký průmysl a další. Umožňuje vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závity a frézovat. Obrobky, které je možné opracovávat, nemohou přesáhnout hmotnost 500 kg.

Stroje této řady mají konstruován rám do tvaru C. Vřeteník s vřetenem umístěný na stojanu má umožněn pouze pohyb v ose Z. Další lineární posuvy v osách X a Y jsou vykonávány pracovním stolem. Pro dosažení pohybu v pěti osách je na lineárním vedení os X a Y usazen otočný a kyvný stůl. Stůl je vybaven prstencovými motory pro pohon náklonu v ose A a otáčení kolem osy C.

Při zakládání obrobku do pracovního prostoru stroje je možné otevření celého rohu stroje. Stroj je ovšem limitován hmotností pohybující se hmoty a velikostí upínacího stolu. Možné je tedy upnout obrobek s maximálním průměrem 520 mm a hmotností 500 kg. Na zakázku je možné měnit pracovní stůl na čtvercový stůl, stůl pro paletový systém.



Obr. 3.6 Obráběcí centrum MCV 1000 5AX [3]

Stroj lze osazovat různými vřeteny stejně jako stroj MCU 630. S použitím dalšího příslušenství lze využít chlazení středem nástroje.

### 3.3 Obráběcí centrum DMG DMU eVo 100

Jak již bylo zmíněno, stroje firmy DMG jsou konkurenčními pro stroje MAS, proto i jejich využití je velmi podobné. Stroj DMU eVo 100 má portálový rám podobně jako stroj MAS MCU 630. Velikost upínacího stolu je 950x800 mm, což ho řadí do velikostně stejné kategorie.

Stroj má umístěn vřeteník na smykadle a saních, které zajišťují pohyby v osách X a Z a zároveň se pohybují příčnicem v ose Y. Pracovní stůl je řešen jako otočný a kyvný, aby zajistil pohyby v osách A a C. Díky dosahovaným vysokým otáčkám až  $800 \text{ min}^{-1}$  je na stroji možné také provádět některé soustružnické operace. Od stůlů použitých u předchozích strojů se konstrukce pracovního stolu stroje podstatně liší, je uložen pouze na jedné straně a osy otáčení spolu nespírají úhel  $90^\circ$ .



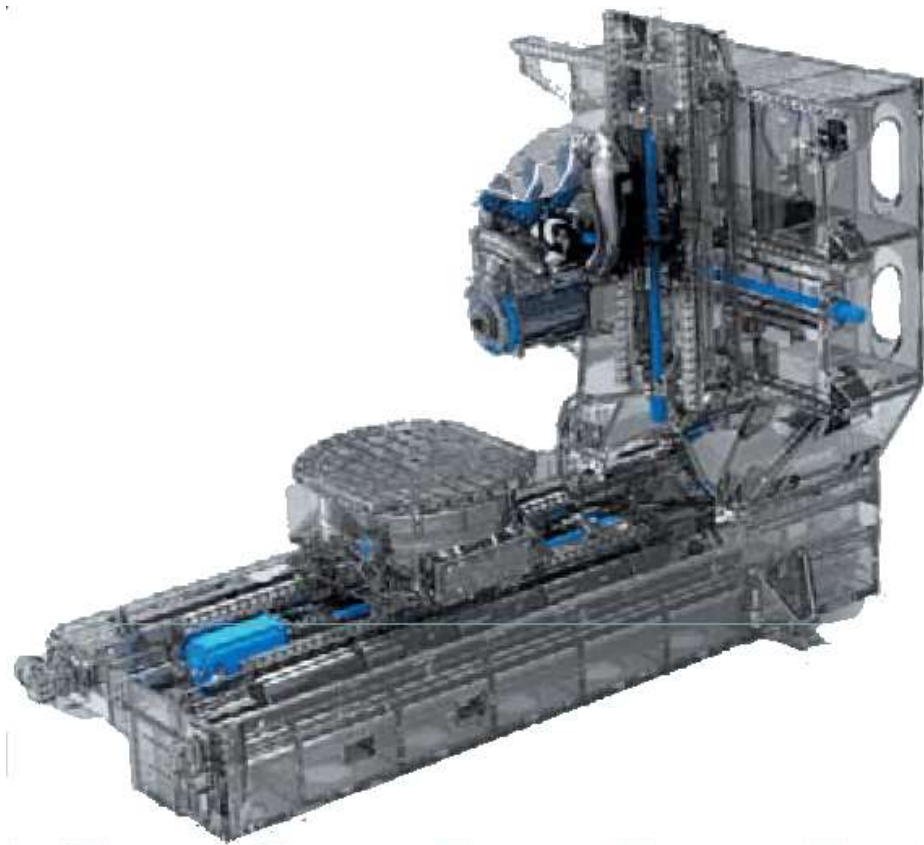
Obr. 3.7 DMU eVo 100 [5]

### 3.4 Obráběcí centrum DMG DMU 100 P duoBlock®

Stroje s označením DMU 100P duoBlock® jsou pětiosá obráběcí centra, kterých je využíváno při obrábění tvarových ploch na součástech mířících například do leteckého nebo energetického průmyslu. Stroj DMU 100 P duoBlock® je konstruován na odlišné koncepci než všechny předchozí stroje.

Rám stroje tvoří písmeno C. Vřeteník je umístěn na stojanu a pohybuje se v osách X a Z. Další pohyby vykonává pracovní stůl, který se otáčí okolo osy C a koná lineární posuv v ose Y. Pro dosažení pohybu v pěti osách, je obráběcí centrum vybaveno otočnou frézovací hlavou, která tak nahrazuje kyvný pohyb stolu v ose A. Konstrukce je uspořádána tak, že složitější pohyby nekoná obrobek, ale otočná frézovací hlava.

Na pracovní stůl tak může být upnut obrobek vážící až 2200 kg o maximálním průměru 1100 mm. Stůl může být v různých provedeních, například pro jednodušší soustružení či pro paletový systém zakládání.



Obr. 3.8 Rám stroje DMU 100 P duoBlock® [8]



### 3.5 Srovnání parametrů jednotlivých strojů

Tabulka 3-1 Srovnání strojů MAS a DMG

Parametr	MCU 630 (MAS)	MCV 1000 5AX (MAS)	DMU 100 eVo (DMG)	DMU 100 P dB (DMG)
Pracovní prostor				
Pojezdy X/Y/Z [mm]	700/820(1200)/550	900/590/520	400/400/375	1000/1250/1000
Upín. plocha fréz/soust. [mm]	∅630/ ∅ 800	∅520	950x800	∅1100x900
Výška stolu nad podlahou [mm]	920	1250	-	-
Obrobek				
Maximální průměr [mm]	∅ 1000	-	-	∅1100
Maximální výška [mm]	500	-	-	1600
Maximální hmotnost [kg]	850	300	1000	2200
Posuvy				
Prac. posuv X/Y/Z[mm/min]	1-60000	1-15000	Max 50000	60000
Rychlo posuv X/Y/Z[mm/min]	60000	40000	-	60000
Opakované najetí [mm]	±0,002	0,004	-	-
Rotační osy				
Rozsah naklápění osy A [°]	150 (+30/-120)	±110	-5/+110	-30/+180
Rozsah otáčení osy C [°]	360	360	360	360
Maximální otáčky osy A [min <sup>-1</sup> ]	25	12	40	30
Maximální otáčky osy C [min <sup>-1</sup> ]	500	20	725	800
Přesnost dělené os A,C [°]	0,001	-	-	-
Vřeteno				
Rozsah otáček [min <sup>-1</sup> ]	20-24000	Max 18000	Max 24000	Max 12000
Kroutící moment S1/S6 [Nm]	60/86	86/120	74/100	82/121
Výkon pohonu vřetene S1/S6 [kW]	19/27	25/35	16/24	28/19
Rozměry stroje				
Délka x šířka x výška [mm]	4880 x 5960 x 3528	4600 x 3600 x 3300	4420 x 5280 x 3387	6296x3709x3415
Hmotnost [kg]	19000	11000		17800

Tabulka 3-2 Srovnání se zadáním

Parametr	Nová koncepce		MCU 630 (MAS)	DMU 100 eVo (DMG)	DMU 100 P dB (DMG)
	Naklápěcí stůl	Otočná hlava			
Pracovní prostor					
Pojezdy X/Y/Z [mm]	1100/1550/1000	1100/1550/1000	700/820(1200)/550	400/400/375	1000/1250/1000
Upín. plocha fréz/soust. [mm]	∅ 800	∅ 800	∅630/ ∅ 800	950x800	∅1100x900
Výška stolu nad podlahou [mm]	890	890	920	-	-
Obrobek					
Maximální průměr [mm]	1200	1200	∅ 1000	-	∅1100
Maximální výška [mm]	900	900	500	-	1600
Maximální hmotnost [kg]	1500	-	850	1000	2200
Posuvy					
Prac. posuv X/Y/Z[mm/min]	-	-	1-60000	Max 50000	60000
Rychlo posuv X/Y/Z[mm/min]	-	-	60000	-	60000
Zrychlení [mms <sup>-2</sup> ]	-	-	6500	-	-
Rotační osy					
Rozsah naklápění osy A [°]		± 180°	150 (+30/-120)	-5/+110	-30/+180
Rozsah otáčení osy C [°]	± 360°	± 360°	360	360	360
Maximální otáčky osy A [min <sup>-1</sup> ]	8	-	25	40	30
Maximální otáčky osy C [min <sup>-1</sup> ]	10	600	500	725	800
Pracovní stůl					
Otáčky soustružení [min <sup>-1</sup> ]	10	600	500	725	800
Krouticí moment soustružení [Nm]	-	-	1250	-	2050
Výkon soustružení [kW]	-	-	-	-	36
Vřeteno					
Rozsah otáček [min <sup>-1</sup> ]	20-24000	Max 24000	20-24000	Max 24000	Max 12000
Krouticí moment S1/S6 [Nm]	60/86	91	60/86	74/100	82/121
Výkon pohonu vřetene S1/S6 [kW]	19/27	34	19/27	16/24	28/19

V uvedených tabulkách jsou zanesené jednotlivé hodnoty charakterizující vlastnosti strojů. V údajích pro novou koncepci je uvažováno s naklápěcím stolem, který vykonává pohyby v osách A a C. Druhá varianta je s otočným stolem a frézovací hlavou otočnou v jedné ose, která nahradí kyvný pohyb stolu v ose A.

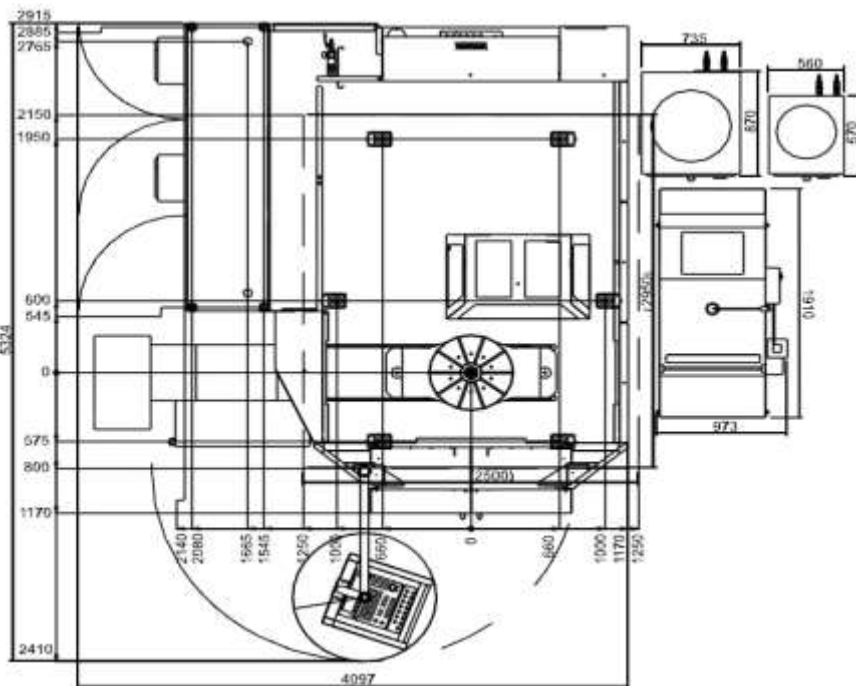
Hodnoty upínacího stolu, kde jsou patrné největší změny, jsou vybrány z katalogu firmy Peiseler. Tato firma se zabývá výrobou nejen otočných stolů, ale i otočných naklápěcích stolů a dalšími produkty pro obráběcí stroje. Při porovnání jednoosých otočných stolů se stoly s dvěma osami (otočná a kyvná) v katalogu je jednoznačné, že větších výkonů dosahují stoly s jednou otočnou osou.

Při bližším srovnání strojů, které používají dvouosý stůl, je patrné, že výrobce této části stroje je schopen dodat stůl s parametry téměř stejnými jako má stůl jednoosý. Není tedy přímo možné řídit se katalogem výrobce, protože v něm nejsou informace o tom, jakých parametrů je možné dosáhnout.

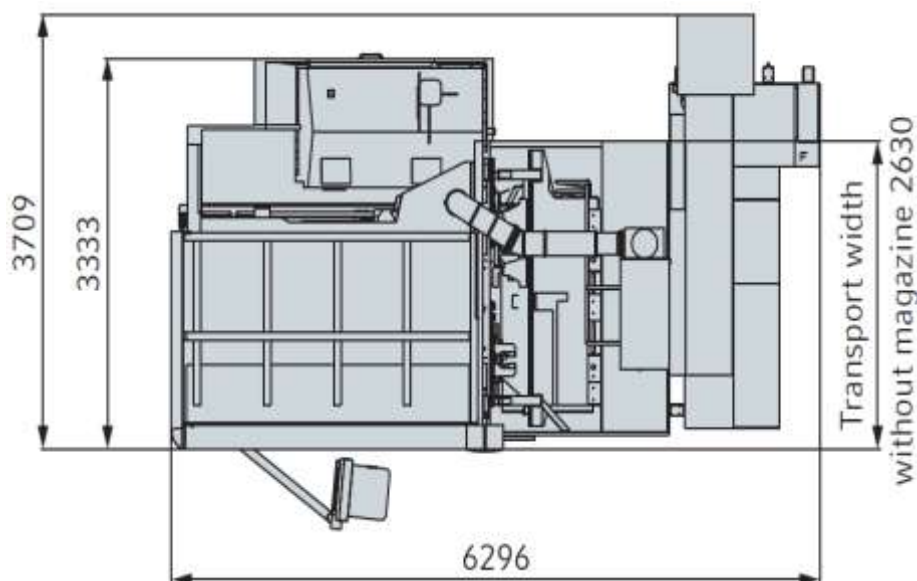


### 3.6 Porovnání stroje MCU 630 a DMU 100 P duoBlock®

Tyto dva stroje jsou již na první pohled rozdílné konstrukcí rámu a volbou pohyblivých částí. Přes jinou konstrukci rámu a volbu umístění pohyblivých pěti os, mají stroje velmi podobné zástavbové rozměry. V otázce hmotnosti je patrný znatelný rozdíl a to v případě stroje DMU 100 P duoBlock®, který je o více než jeden tisíc kilogramů lehčí než stroj MCU 630 z dílen firmy Kovosvit MAS.



Obr. 3.10 Pohled shora MCU 630 [6]

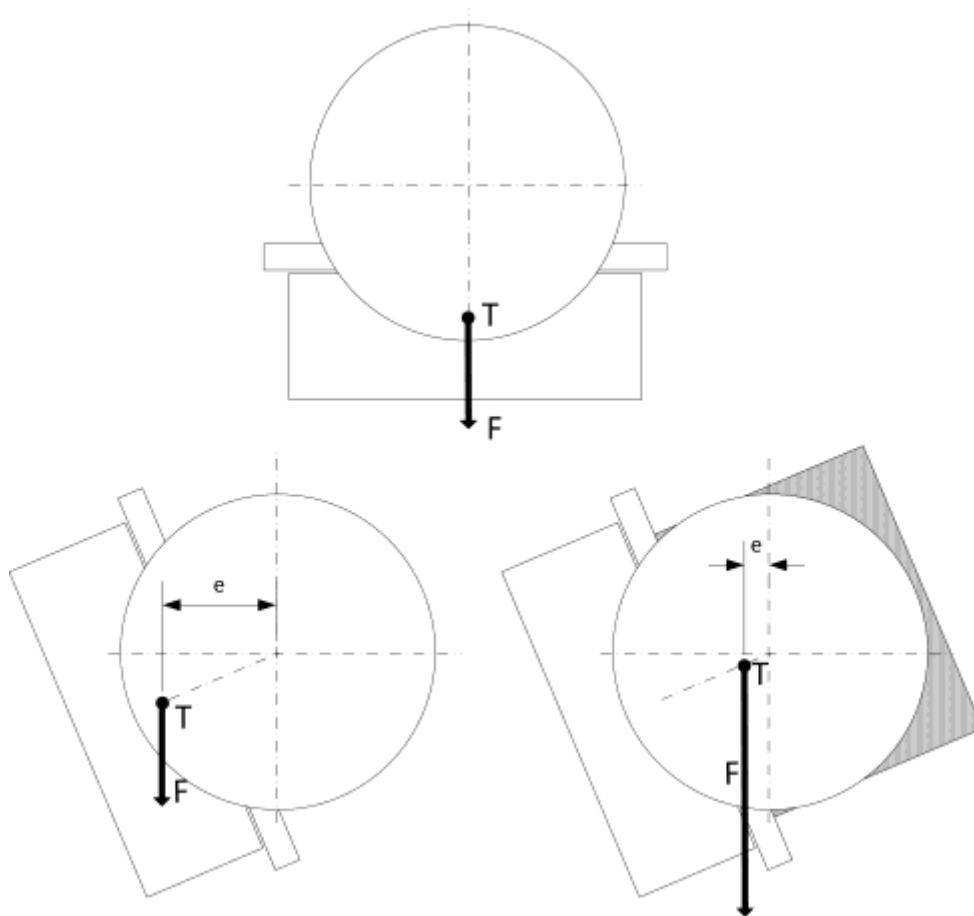


Obr. 3.9 Pohled shora DMU 100P duoBlock® [8]

Stroj MCU 630 využívá dvouosý stůl a vřeteno pohybující se v základních třech osách X, Y a Z. Rozložení pohybující se hmotnosti je závislé na velikosti obrobku. Stroj dokáže souvisle obrábět ve všech pěti osách, které má k dispozici. Zároveň je možné využít stroj také pro soustružení a to když je hydraulickou brzdou zabrzděno vřeteno, do kterého je upnut soustružnický nůž. Stůl pak plně využívá výkonu pro pohon pohybu okolo otočné osy C. Naklápění stolu tento pohon komplikuje. Způsob řešení pohánění otočné osy je složitější než u stolu bez naklápění. Tento problém lze řešit několika možnostmi, například převodovými koly.

Stroj MCU 630 však využívá jiné možnosti, kterou je moderní prstencový motor umístěný přímo pod upínací deskou stolu. Stejně motory jsou využity také pro pohon naklápění. Celkem tedy dvě rotační osy stroje (A, C) pohánějí prstencové motory, které jsou ještě vybaveny hydraulickou brzdou pro zafixování potřebné polohy. Výhodou tohoto řešení je minimalizace vůlí odstraněním převodů a také možnost kontinuálního řízení.

Zajímavostí stolu s „kolébkou“ je statické zatížení při jeho naklápění. Protože upínací deska je umístěna mimo osu naklápění A, dojde při upnutí obrobku na desku ke zvýšení těžiště – v klidové poloze je pod vodorovnou rovinou, ve které osa leží. Čím bude obrobek vyšší, tím se bude těžiště celé pohybující se hmoty přibližovat k ose otáčení. To znamená, že při vyklonění stolu je statické namáhání od klopného momentu menší, pokud je na desce upnut obrobek takové velikosti a hmotnosti, aby těžiště celé kývající se hmoty bylo co nejbližší ose otáčení A, jako je znázorněno na obr. 2.11.



Obr. 3.11 Schéma posunutí těžiště

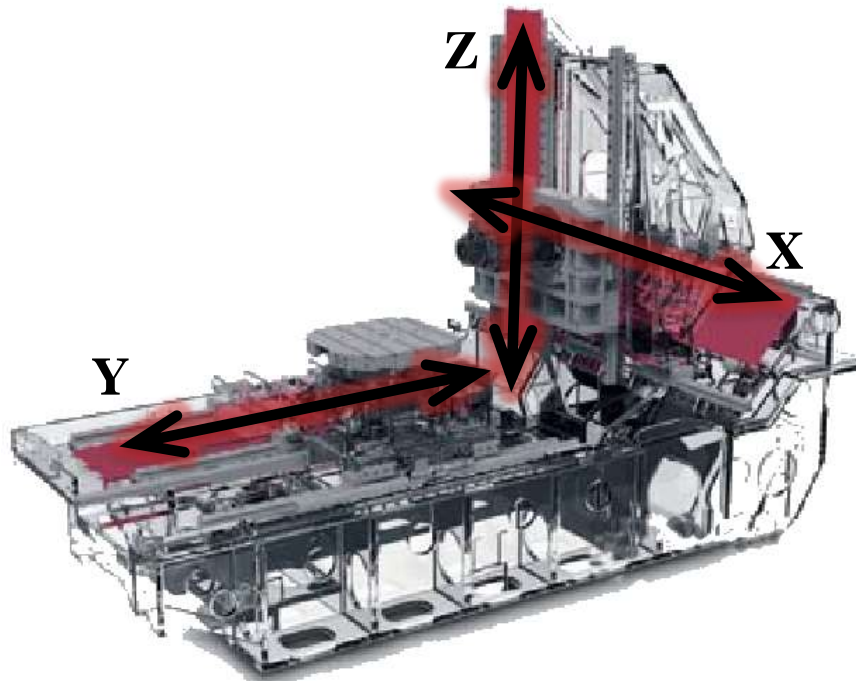
Hmotnost, se kterou stroj při obrábění pohybuje, vždy závisí na velikosti obrobku. Protože obrobkem nebude válec upnutý do středu upínací desky, musí se při řešení zátěžný stavů počítat s tím nejméně vhodným pro současné otáčení stolu okolo osy C a naklápění okolo osy A. zvolit tedy stav, kdy je namáhání největší.

Při pohledu z druhé strany, upnutí a pohyb nástroje, má tento koncept stroje značnou výhodu. Řešení se významně neodlišuje od strojů se třemi řízenými osami. Samotné vřetení je vloženo do saní, které pojíždí ve svislém směru po vedení na smykadle. A smykadlo pak následně v příčném směru po vedení na příčku, který je veden ve směru dopředu a dozadu po vedení umístěném na rámu stroje. Pro dosažení dostatečného výkonu vřetení je využito elektro vřetení s vlastním pohonem v jeho těle. Odpadají zde převodové prvky a je možné snadno plynule regulovat jeho otáčky. Vložením vřetení do saní je dosaženo dobré tuhosti při odebrání větší třísky při hrubovacích operacích.



Obr. 3.12 Vřeteník stroje MCU 630 I61

Stroj DMU 100 P duoBlock<sup>®</sup> má oproti předchozímu stroji rám ve tvaru C. Pro dosažení souvislého obrábění v pěti osách využívá dvě rotační osy a tři osy lineární. Jedna z rotačních os je umístěna na jednoosý stůl (osa C) a druhá rotační osa na naklápěcí frézovací hlavu. Svislá a příčná osa je pak umístěna na smykadle a saních. Pro pohyb dopředu a vzad je poháněn v lineárním směru otočný stůl, který takto pojíždí po vedení na loži stroje.



Obr. 3.13 Znárodnění lineárních pojezdů DMU 100P duoBlock<sup>®</sup> [8]

Tímto řešením stolu se přenese jedna rotační osa ze stolu na frézovací hlavu. To způsobí, že hmotnost obrobku bude ovlivňovat jen pohony lineárního vodorovného pohybu a rotačního pohybu stolu. Pohony pohybu ve vertikálním směru a rotačního pohybu frézovací hlavy nejsou obrobkem nijak ovlivněny.

Protože stroj nemá portálový rám, ale otevřený rám do tvaru C, jeho pracovní prostor je omezen pouze krytovaním. Krytování lze však uspořádat podle potřeby a uvažované velikosti obrobku. Zástavbové rozměry tohoto stroje tedy spíše závisí na velikosti obrobku než na jeho hmotnosti, která požaduje mohutnost celého rámu a naklápěcího stolu.

V druhém případě, při obrábění malých obrobků je nutné hýbat frézovací hlavou. V tomto případě, je však nutné říci, že při použití stroje s naklápěcím stolem musí být v pohybu tento stůl.

Stroj DMU 100P duoBlock<sup>®</sup> je konstruován i pro soustružnické práce a funguje jako svislý soustruh. Frézovací hlava, ve které je upnut soustružnický nůž se nastavuje do správné polohy vůči otáčení stolu. Otočný stůl, který pojíždí v ose Y, musí být vybaven dostatečně výkonným pohonem pro rotační osu. Tento pohon lze vyřešit jednodušeji než u naklápěcích stolů. Lze snadno využít například šnekového převodu. Ve většině případů, ale výrobce volí možnost prstencového motoru. Dojde tím k eliminaci vůlí, které by jinak vznikali v převodech. Oproti stroji firmy MAS je použit pouze jeden tento motor. Frézovací hlava je vybavena elektro vřetenem.

### 3.6.1 Maximální dosažitelné parametry strojů

Stroje MCU 630 a DMU 100P duoBlock<sup>®</sup> jsou navrženy pro operace soustružení a frézování. Obě firmy sestavují parametry stroje podle zákaznických požadavků. Pokud tedy zákazník požaduje maximální možné výkony, nejsou parametry stroje stejné jako standardní parametry uváděné v tabulkách katalogů, ale větší. Tyto parametry jsou uvedeny v následující tabulce. Tabulka je sestavena tak, aby bylo možné posoudit, jaké jsou maximální možnosti obou strojů, a která konstrukce je výhodnější. Výrobce tyto parametry uvádí především pro operace označené jako výkonové vrtání, závitování a frézování.

Tabulka 3-3 Nestandardní výkonové parametry strojů

Parametr	Jednotky	Stroj	
		MCU 630 (MAS)	DMU 100P dB (DMG)
Stůl		Otočný naklápěcí	Otočný posuvný
Otáčky	min <sup>-1</sup>	500	800
Výkon	kW	32,5	46
Moment	Nm	1250	3400
Zatížení	kg	1200	2200
Vřeten		Ve smykadle	Jednoosá frézovací hlava
Výkon	kW	26	32
Moment	Nm	340	1100

Předpokladem vyšších parametrů stroje firmy DMG je jeho patentovaná konstrukce s názvem duoBlock<sup>®</sup>. Díky této konstrukci je eliminována hmotnost pohybující se ve vertikálním směru a je tak dosaženo snadného obrábění obrobků o větší hmotnosti. Jednoduší otočný stůl také může dosahovat větších výkonů, protože s obrobkem pouze otáčí. Naklápěcí pohyb nahrazuje frézovací hlava. Ta se může otáčet pouze kolem jedné osy a to tak, aby nahradila kyvný pohyb stolu. Je namontována na smykadlo a vybavena elektro vřetenem, pro dosažení většího výkonu a eliminaci vůlí.

Pro větší obrobky, je tedy dle předchozího srovnání výhodnější stroj bez naklápěcího stolu. Nelze však přesně definovat, kde se nachází hranice, od které použít stroj bez „kolébky“. Avšak lze říci, že v závislosti na předpokládaných operacích, které bude stroj provádět na obrobkách s hmotností blížící se 1200 kg, se přibližuje i použití stroje s otočnou frézovací hlavou a otočným stolem. S dále rostoucí hmotností se pak stroj s „kolébkou“ stává nevhodným, z důvodu vznikajících dynamických sil, zatížení pohonu stolu a energetickou náročnost pohybování obrobkem.

## 4 Nové koncepte řešení stroje s portálovým rámem

Při návrhu nové koncepce stroje je hlavním požadavkem zvýšení výkonů stroje pro větší obrobky, při zachování co nejvíce funkčních celků již vyráběného a prověřeného stroje MCU 630. Předchozím porovnáním dvou odlišných konceptů strojů bylo dosaženo závěru, že pokud bude stroj obrábět větší obrobky, to znamená především s hmotností nad tisíc kilogramů, je výhodnější použití pouze otočného stolu. A otočný stůl kombinovat s otočnou frézovací hlavou, čímž se dosáhne požadovaných řízených pěti os.

Stroj MCU 630 bude upraven, tak aby mohla být nasazena jednoosá otočná frézovací hlava a otočný stůl. Frézovací hlava musí plně nahradit kyvný pohyb stolu. Protože rám je konstruován jako portál, pro využití dědičnosti konstrukce by měl i budoucí koncept disponovat portálovým rámem.

### 4.1 Charakteristické parametry nové koncepce stroje

Tabulka 4-1 Parametry nové koncepce stroje

	;	Nová koncepce	Původní stroj
Parametr	Jednotky	Hodnota	
Stůl		Otočný	Otočný naklápěcí
Otáčky	min <sup>-1</sup>	800	500
Výkon	kW	46	32,5
Moment	Nm	3400	1250
Zatížení	kg	2200	1200
Vřeteno		Jednoosá frézovací hlava	Ve smykadle
Výkon	kW	32	26
Moment	Nm	1100	340

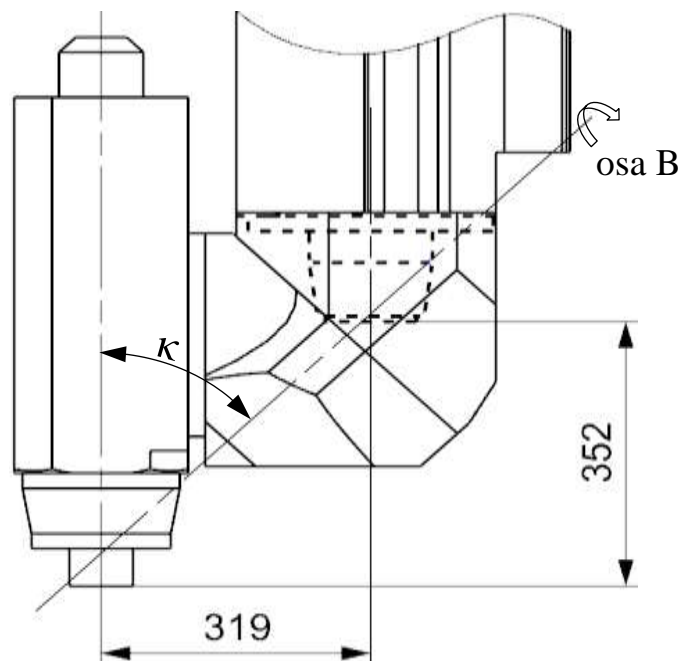
Hodnoty nové koncepce vycházejí z konkurenčního stroje firmy DMG Mori Seiki DMU 100P duoBlock®.

### 4.2 Navržené varianty řešení

Aby byl zachován původní rám stroje a jeho součásti, jsou nové koncepte řešeny bez lineárního pohybu stolu, stůl bude pouze otočný. Ostatní pohyby jsou vykovány vůči obrobku vřetenem. Vřeteno, které je součástí otočné frézovací hlavy vykonává jak pohyb v jedné rotační ose, tak i pohyby ve třech lineárních osách. Frézovací hlava je umístěna na smykadle, které je uloženo na saních a koná vertikální pohyb v ose Z. Saně se pohybují příčně v ose X a příčnick, na kterém jsou vedeny, zajišťuje pohyb dopředu a dozadu v ose Y.

#### 4.2.1 Úpravy původního řešení

Pro upevnění frézovací hlavy na smykadlo stroje je využito původní dutiny od vřetene předchozího. Část těla frézovací hlavy je tak tvořeno smykadlem a nedojde proto k enormnímu nárůstu hmotnosti. Přesto je vřeteník posunut o 352 mm níže v ose Z a o 319 mm dopředu v ose Y. Toto posunutí je znázorněno na následujícím obrázku (obr. 3.1), čárkovaně je vykreslen půdní vřeteník.



Obr. 4.1 Původní vřeteník – nasazená frézovací hlava

Dále dochází k problému pro zachování pojezdu v ose X. Pokud bude frézovací hlava směřovat svisle dolů, jsou tyto pojezdy stejné. Otočí-li se podle osy B, dojde k vyklonění vřetene do boku a tím ke zmenšení pojezdu v ose X, pokud nebude pracovní prostor toto vyklonění umožňovat.

K meznímu stavu dochází, pokud je nutné obrábět pod úhlem šedesát stupňů na levém nebo pravém okraji stolu. V takovém případě je nutné natočit frézovací hlavu okolo osy B o devadesát stupňů. Tímto natočením dojde k maximálnímu vyklonění frézovací hlavy do strany.

Požadovaný úhel je možné vypočítat dle následujících vztahů, které vyhovují i pro frézovací hlavu se dvěma rotačními osami, v tomto případě je však druhá rotační osa přenesena na stůl:

$$\varphi_1 = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\sin\left(\kappa - \frac{\delta}{2}\right)}}{\sqrt{\sin\left(\kappa + \frac{\delta}{2}\right)}} \right);$$

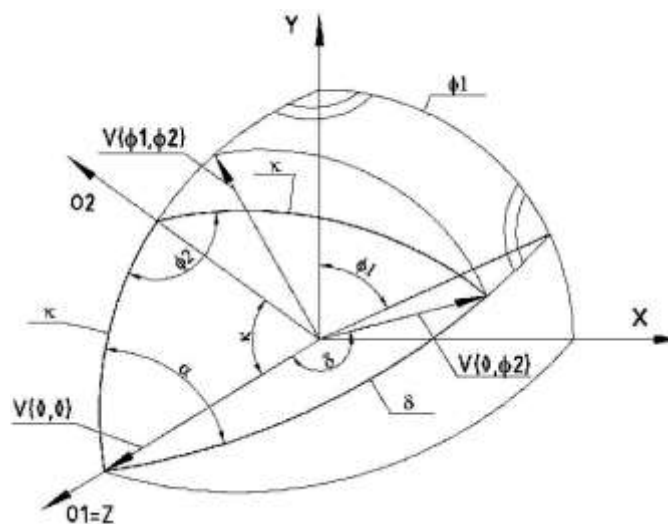
$\kappa$  – úhel sklonu osy B od osy vřetene,  
 $\delta$  – úhel obráběné plochy od svislice,  
 $\varphi_1$  – úhel natočení okolo osy B,  
 $\varphi_2$  – úhel natočení stolu,

$$\varphi_2 = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\left(\kappa - \frac{\delta}{2}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\sin\left(\kappa - \frac{\delta}{2}\right)}}{\sqrt{\sin\left(\kappa + \frac{\delta}{2}\right)}} \right);$$

Při použité frézovací hlavě s  $\kappa = 45^\circ$  platí při obrábění plochy pod úhlem  $\delta = 60^\circ$  následující výpočet:

$$\varphi_2 = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\left(\kappa - \frac{\delta}{2}\right)} \cdot \sqrt{\frac{\sin\left(\kappa - \frac{\delta}{2}\right)}{\sin\left(\kappa + \frac{\delta}{2}\right)}} \right) = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\sin\left(\frac{60}{2}\right)}{\left(0,785 - \frac{1,047}{2}\right)} \cdot \sqrt{\frac{\sin\left(45 - \frac{60}{2}\right)}{\sin\left(45 + \frac{60}{2}\right)}} \right)$$

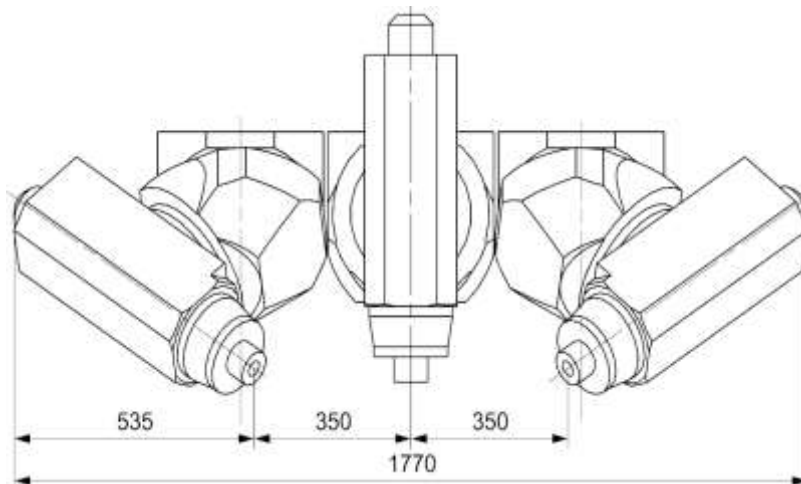
$$\varphi_2 = 90^\circ$$



Obr. 4.2 Zobrazení úhlů na vřetení

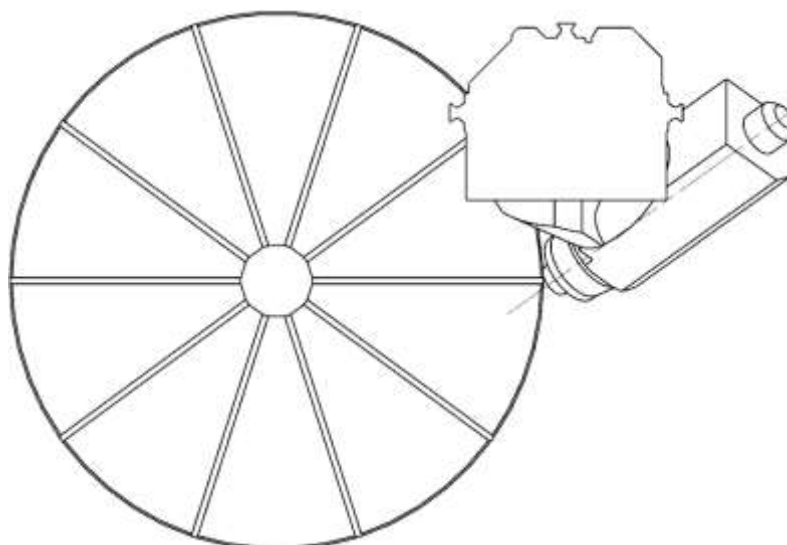
Na obrázku 3.2 je patrná závislost mezi jednotlivými úhly při natáčení frézovací hlavy. Čelo nástroje se pohybuje po části kulové plochy. Na obrázku je vyznačena osa O2 jež odpovídá ose B a osa O1, která odpovídá ose nástroje upnutého do vřeteníku.

Krajní polohy na modelu jsou demonstrovány pomocí následujících obrázků (obr. 3.3, obr. 3.4), ve kterých jsou znázorněny maximální kóty dosahu frézovací hlavy v pracovním prostoru stroje.



Obr. 4.3 Nárůst velikosti pracovního prostoru vlivem vyklonění





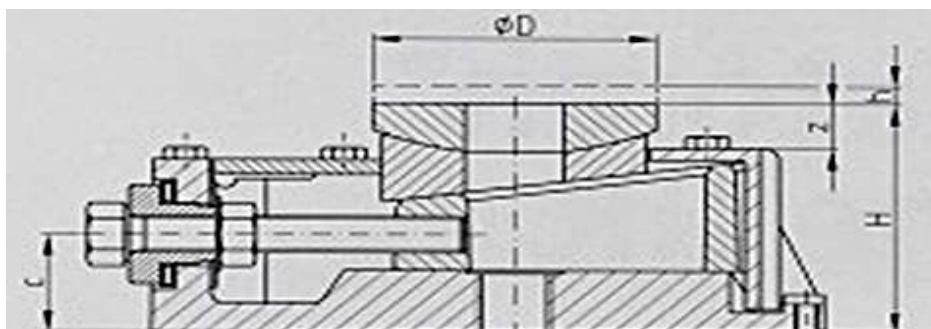
Obr. 4.4 Krajní poloha frézovací hlavy – pohled shora

Další změny způsobí použití jednoosého stolu. Původní stůl byl uložen v bocích rámu, kde jsou pro tento účel zhotoveny prostory v odlítku. V rámu stolu tak byly uloženy prstencové motory pohánějící naklápění stolu.

Výrobce stroje MCU 630 uvažoval o použití jednoduchého stolu s jednou otočnou osou již v minulosti. Z této úvahy nakonec sešlo a v rámu stroje zbyly patky pro upevnění tohoto stolu. Na stroji MCU 630 se používají při transportu pro fixaci „kolébkového“ stolu, nebo při jiných nestandardních operacích se strojem. Tyto patky lze však s výhodou použít nyní pro upevnění nového stolu. Patky jsou v pracovním prostoru stroje čtyři a lze k nim šrouby pomocí takzvaných BW fixátorů pro snadné vyrovnání připevnit pracovní stůl.

Pro upevnění stolu do rámu stroje je použito několika částí. Samotný stůl je přišroubován k desce. K tomuto účelu je vybaven montážními úchyty s otvory pro šrouby. Deska se stolem překlene původní otvor pro odvod třísek a pomocí BW fixátorů nebo broušených podložek je připevněna do rámu stroje.

BW fixátor se skládá z několika dílů. Hlavní částí je tělo, ve kterém se pohybuje klín a vytlačuje směrem vzhůru speciální podložku kotvícího šroubu. Klín je ovládaný šroubem, který se nastavuje podle potřeby vyrovnání upínací plochy do vodorovné roviny. Pokud je tento ovládací šroub utahován přitahuje klín a ten přes podložku zvedá stůl v daném místě.



Obr. 4.5 BW fixátor v podélném řezu

Ustavení desky do původního rámu při montáži pomocí podložek je levnější způsob než použití BW fixátorů. Přímou při montáži je možné podložky brousit na požadovanou tloušťku a dosáhnout tím přesného ustavení stolu.

Pokud by si však celá montovaná sestava stroje časem usadila a bylo by nutné znovu vyrovnat polohu upínacího stolu, je nutné celou sestavu demontovat. Při použití BW fixátoru stačí pouze správně povolit či utáhnout stavěcí šroub a dotáhnout šrouby kotvicí. Stůl je tímto způsobem připevněn na čtyřech místech.

Protože vlivem umístění frézovací otočné hlavy došlo k posunutí osy vřeten o 319 mm v ose Y směrem dopředu, je nejjednodušším řešením tohoto problému posunutí stolu o tuto hodnotu za vřetenem. Díky použití desky se jedná o velmi malou úpravu na stroji. Je nutné posunout patky, které jsou již umístěné v pracovním prostoru stroje a jsou spojeny s žebry v rámu stroje na žebra, která jsou blíže k čelu rámu stroje. Posunutí těchto patek se jednoduše přizpůsobí žebřům v rámu a stůl se vyrovná na desce. Tím se dosáhne posunutí o požadovanou hodnotu bez velkého zásahu do rámu stroje.

Zmiňovaná deska je tvořena plochou pro upnutí stolu, na kterou jsou dle umístění úchytů na pracovním stole vytvořeny díry pro jeho upnutí. Z druhé strany má deska osazení pro umístění BW fixátorů. V tomto usazení jsou vytvořeny díry pro kotvicí šrouby dle roztečí patek na stroji. Deska je pak jednoduše výškově stavitelná pomocí BW fixátorů do správné polohy.



Obr. 4.6 Deska pro uložení stolu

#### 4.2.2 Tvorba nové koncepce

Nová koncepce stroje musí vyřešit změny konstrukce, které přinášejí řadu problémů.

- Zvětšení pracovního prostoru stroje
- Změna délky pojezdů lineárních os
- Uložení nového stolu
- Vznik nových zatížení

##### Zvětšení pracovního prostoru stroje

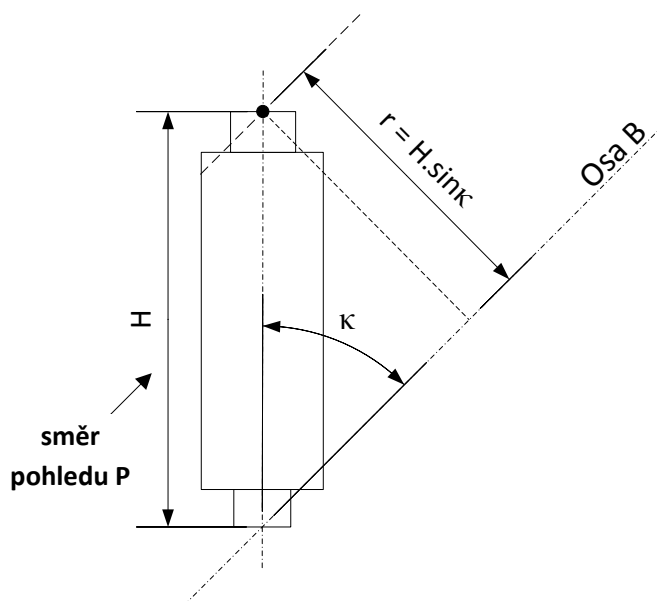
Velikost pracovního prostoru je dána dvěma základními parametry:

- a) Velikost obrobku
- b) Dráha nástroje kolem obrobku

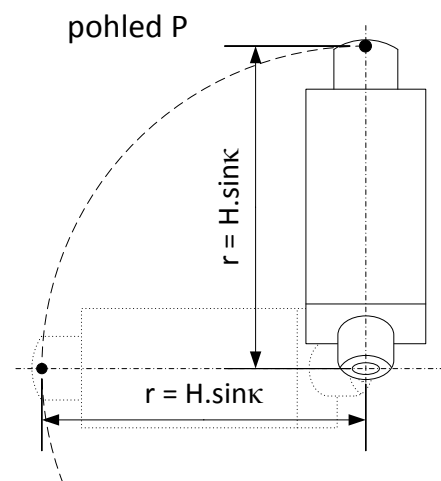
Nový stroj je stavěn pro větší obrobky než stroj MCU 630, což znamená nutnost nárůstu pracovního prostoru. Pracovní prostor musí být dostatečně velký na to, aby se do něj obrobek vešel a nástroj, kterým je obráběn se kolem něho mohl bez problému pohybovat po daných dráhách. Je nutné uvažovat frézovací hlavu, která se bude naklápět do stran.

Výpočet vyklonění frézovací hlavy:

Uvažované rozměry –  $H = 730\text{mm}$ ,  $\kappa = 45^\circ$



Obr. 4.7 Vřeteno frézovací hlavy



Obr. 4.8 Pohled ve směru osy otáčení B

Jak již bylo zmíněno výše, k největšímu výklonu dochází při otočení o kolo osy B o  $90^\circ$  (viz obr. 3.7 a 3.7). Velikost vyklonění se rovná poloměru kružnice  $r$ , kterou opisuje na vrcholu vřetene. Samotný výpočet je pouze sklopení výšky vřetene  $H$  do roviny, jejíž normálou je osa B. Tedy o úhel  $\kappa$ .

$$\sin \kappa = \frac{r}{H} \quad \Rightarrow \quad r = H \cdot \sin \kappa$$

$$r = 730 \cdot \sin 45^\circ = 517\text{mm}$$

Maximálního prostoru bude tedy využito, pokud stroj obrábí s takto nakloněnou hlavou na pravém nebo levém kraji obrobku o průměru 1200mm. Pokud bude uvažován nástroj, který po upnutí dosahuje vyložení od vřeteníku 100mm bude nutné dosáhnout širě pracovního prostoru 2234mm.

Ve směru osy Y se vyložení frézovací otočné hlavy vykompenzuje pracovním stolem, který se z části posune dopředu. Pro dostatečný prostor při pohybu vzad je nutné posunutí zásobníku nástrojů. Zvětšení ve směru osy Z je nutné řešit zvednutím základní polohy vřeteníku.

V důsledku těchto změn je nutné upravit původní rám stroje a pracovní stůl.

### Změna délky pojezdů lineárních os

Rozšířením pracovního prostoru a nutností dostat se na levý a pravý okraj většího obrobku musí narůst také pojezd ve směru osy X. Pohon v této ose je v původním stroji řešen kuličkovým šroubem a asynchronním servomotorem. Odměřování polohy pomocí pravítek, které je doplněno snímáním otáček servomotoru.

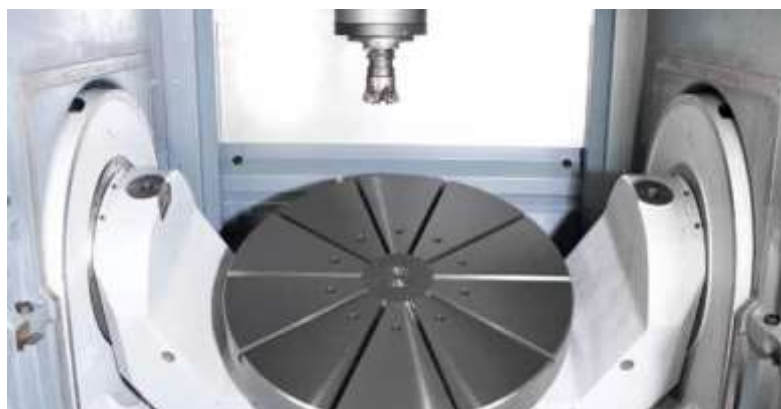
Na nové koncepci stroje je nutné zvýšit délku pojezdu. Nárůst délky lze vyřešit prodloužením vedení a kuličkového šroubu. Pohánění není nutné měnit, lze využít stejného principu jako u původního stroje.

Při pohybu ve směru osy Y dochází ke stejnému problému. Nabízí se tedy stejné řešení prodloužením vedení a kuličkového šroubu při zachování původní pohonné jednotky.

Ve směru osy Z nedojde k žádné změně. Celá soustava pojezdu v tomto směru bude zdvižena výš, aby kompenzovala nižší položení vřeteníku na otočné frézovací hlavě. Výška upínací desky pracovního stolu od podlahy zůstává stejná. Musí tedy dojít ke zvýšení výšky celého stroje.

### Uložení nového stolu

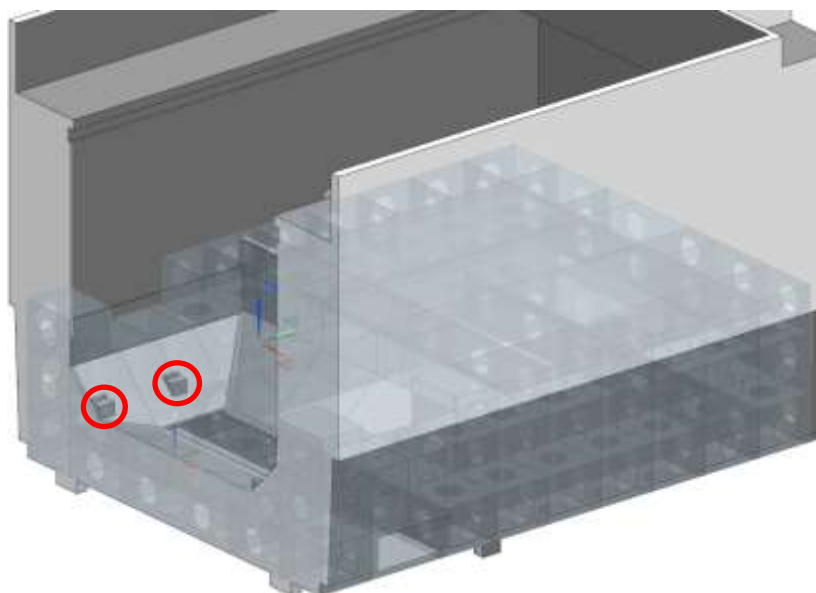
Použitím pouze otočného stolu vzniká problém s jeho zakomponováním do rámu stroje. Stůl nemá žádná ramena, která by mohla být vsazena do vytvořených otvorů pro stůl „kolébkový“ (viz obr. 3.9).



Obr. 4.9 Ukotvení původního pracovního stolu v rámu stroje [6]

Pod původním pracovním stolem se nachází otvor pro odvod třísek, pod kterým je vložen dopravník. Na bočních spádových stěnách jsou vytvořeny čtyři patky, na každé straně dvě (viz obr 3.10).

Nový pouze otočný stůl musí tento otvor překlenout, čehož je dosaženo deskou zobrazenou na obr. 3.6. Deska je pomocí šroubů připevněna k patkám a tvoří plochu pro upevnění otočného stolu.



Obr. 4.10 Zobrazení lože původního stroje

Patky jsou odlity spolu s ložem stroje a následně obrobeny. Aby bylo uložení desky se stolem dostatečně přesné a bylo možné vyrovnat stůl do požadované roviny, je nutné použít mezičlen. Tím je BW fixátor nebo podložky. V následující tabulce 3 – 2 je zhodnocení vlastností, které přináší obě využitelné možnosti.

Ve sloupcích tabulky jsou body jednotlivých vlastností. Vlastnosti jsou uvedené v příslušném řádku. Bodování je voleno 1 – 5, 5 nejlépe hodnocená vlastnost, 1 nejhůře.

Tabulka 4-2 Váhy vlastností podložek a BW fixátoru

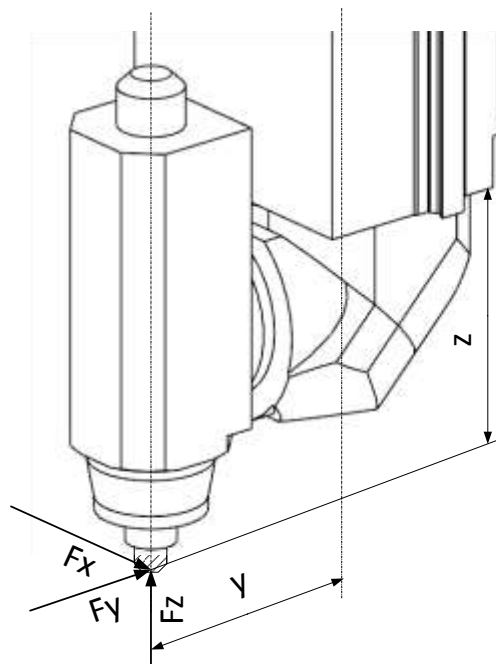
Vlastnosti	Podložky	BW fixátor
Konstrukce	5	2
Výroba	4	2
Montáž	4	3
Nastavení polohy	2	5
Spolehlivost	4	4
Pozdější nastavení polohy	1	5
Cena	5	1
Suma bodů	24	22

Podle uvedeného hodnocení vlastností obou možností řešení, je lepší použití podložek. Především s ohledem na cenu podložek. Podložky jsou upraveny přímo při montáži desky na lože stroje. Jsou broušeny na přesnou hodnotu, která je požadována pro vyrovnání polohy upínací desky pracovního stolu.

Je možné uvažovat také vlastní výrobu BW fixátoru pro snížení ceny (výkres přiložen v příloze). A znovu pak posoudit vhodnost použití.

#### Vznik nových zatížení.

V původním stroji byl vřeteník zakomponován ve smykadle. Nový koncepce je vybavena jednoosou frézovací hlavou, která z části využije místo ve smykadle stroje. Celý vřeteník však bude mimo smykadlo. Nástroj je tedy vyložen do jiného místa než na původním stroji a řezné síly, které působí na rám stroje, budou také působit v jiných místech (viz obr. 3.11).



Obr. 4.11 Síly působící na frézovací hlavu při obrábění

Od síly  $F_x$  působící ve směru osy X vznikají dva momenty. Jeden od této síly na ramenu y, ten to se snaží vřeteno vyklonit do strany, druhý od této síly na ramenu Z se snaží vřeteno otočit vzhůru.

Od síly  $F_y$  působící ve směru osy Y vzniká jeden moment a to od působení touto silo na rameno z. Tento moment se snaží otočit frézovací hlavou v rovině YZ dozadu.

Od síly  $F_z$  působící ve směru osy Z vzniká jeden moment. Tento moment působí proti momentu od síly  $F_y$ , pokud tedy síly působí ve směrech, jak je uvedeno na obr. 3.11 a snaží se frézovací hlavu v rovině YZ zvednout vzhůru.

Tyto nová zatížení, která namáhají smykadlo, saně a přes příčnick se přenášejí do stojanů a lože stroje je nutné zohlednit v návrhu jednotlivých částí stroje. Pokud dojde k zachování těchto částí, je nutné je zkontrolovat a popřípadě znovu dimenzovat a upravit tak, aby stroj mohl bezchybně obrábět v požadované kvalitě povrchu a přesnosti. Návrh jednotlivých částí stroje je však nad rozsah této práce, proto nebude dále rozebírán.

### 4.2.3 Varianta I

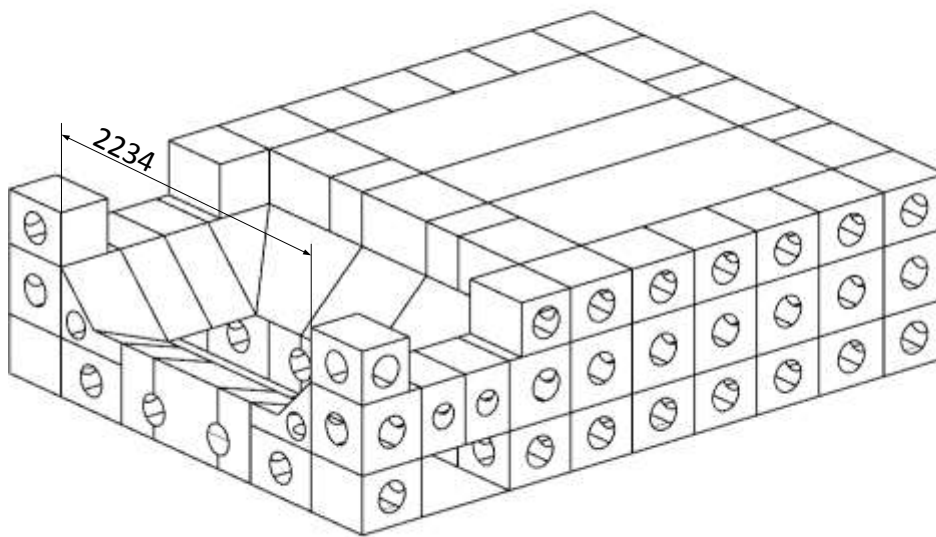
První varianta nového stroje, která řeší zmíněné problémy je postavena stejným způsobem jako původní stroj. Je složena z:

- Lože
- Stojanů
- Příčnicku
- Saní
- Smykadla

Jednotlivé díly jsou upraveny tak, aby při jejich sestavení bylo dosaženo parametrů, které jsou požadované po nové koncepci stroje. Zároveň však bylo vynaloženo úsilí, aby nedocházelo k příliš velkým změnám v konstrukci rámu a mohlo být použito co nejvíce částí z původního stroje.

#### Lože

Tuto část rámu je nutné rozšířit, aby byl zajištěn dostatečný pracovní prostor. Po celé délce lože jsou postaveny stojany, po kterých se pohybuje příčník. Pracovní prostor se tedy musí vejít mezi oba stojany na pravém a levém kraji lože. Původní stroj má vnitřní vzdálenost mezi stojany 1300 mm. Nová koncepce má průměr stolu 1200 mm a je nutné počítat ještě s vyklopení frézovací hlavy. Rozšíření tedy musí být alespoň o 470 mm z každé strany. Vnitřní vzdálenost mezi stojany tak musí být minimálně 2234 mm.



Obr. 4.12 Návrh rozšíření lože nové koncepce

Lože je vyrobeno jako odlitek z šedé litiny. Je zachována stejná konstrukce jako původního lože, bylo by tedy možné využít některých částí modelů pro nový odlitek.

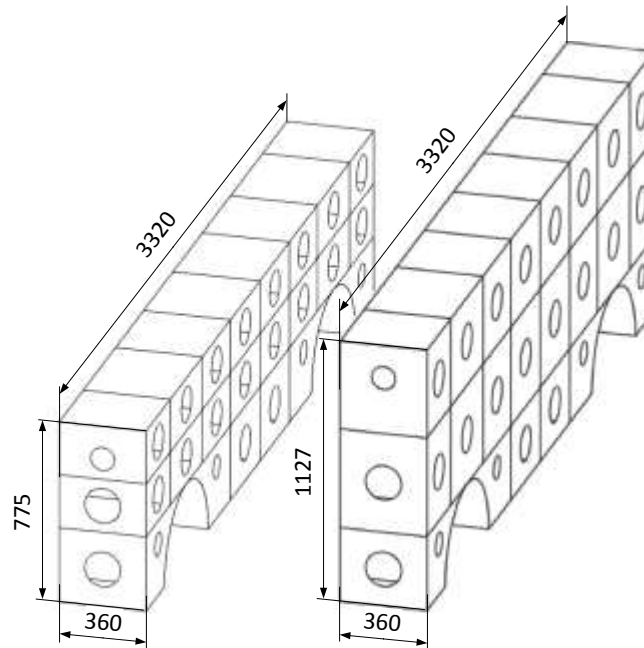
Protože dojde nárůstu rozměrů, zvýší se i objem použitého materiálu. Tím se zvedne hmotnost celého lože a to přibližně o 14% hmotnosti původního lože. Také se zvětší zástavbové rozměry stroje především do šířky o 720 mm.

### Stojany

Stojany jsou u první varianty nové koncepce stroje pevně spojeny s ložem a tvoří z obou stran boky stroje. Na horní ploše stojanů je umístěno vedení, po kterém se pohybuje příčník.

Je nutné dosáhnout zvýšení výchozí polohy nástroje z důvodu nižšího položení vřeteníku, což je způsobeno vlivem vyložení frézovací hlavy. To lze realizovat vyššími stojany. Tím se celá pohyblivá část stroje zvedne o požadovanou vzdálenost.

Původní výška obou stojanů je 775 mm, u nové koncepce je však vřeteník o 352 mm níže než u původního stroje. Stojany je tedy nutné zvýšit o tuto hodnotu na 1127mm.



Obr. 4.13 Původní a nový stojan

Stojan je stejně jako lože odlitek z šedé litiny. Konstrukce je zachována stejná jako u původního stojanu, je zvětšena pouze výška. Bylo by tedy možné využít některých částí původních modelů pro nový odlitek.

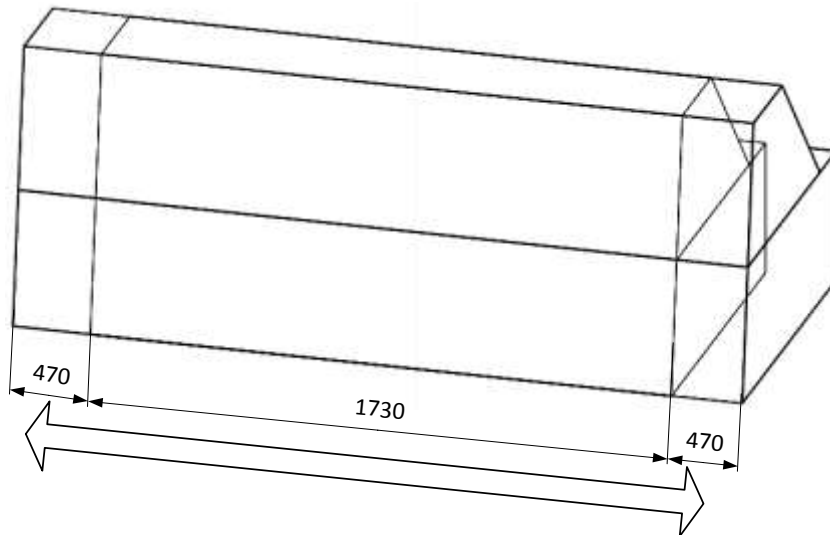
Protože dojde nárůstu rozměrů, zvýší se i objem použitého materiálu. Tím se zvedne hmotnost celého stojanu a to přibližně o 34% hmotnosti původního stojanu. Stojany jsou vždy použity dva a jsou identické. Zvýšením stojanů dojde k nárůstu výšky celého stroje.

### Příčník

Příčník uzavírá portálový rám a spojuje tak stojany. Musí být rozšířen tak, aby dosáhl na vodící plochy umístěné na stojanech. Zároveň musí zaručit dostatečnou délku vedení saní, které po něm pojíždějí ve směru osy X.

Stojany posunou podle rozšíření lože, musí být i příčník zvětšen ve stejném poměru. Jeho šířka se zvětší o 470 mm z každé strany. Další rozměry zůstávají zachovány beze změny.





Obr. 4.14 Rozšíření původního příčnicku

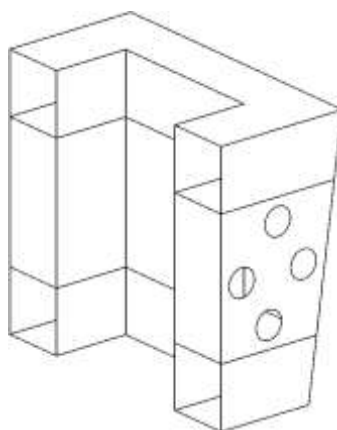
Příčnick je část stroje, která je považována za více namáhanou než dvě předešlé. Je proto vyroben jako odlitek z tvárné litiny, která má lepší mechanické vlastnosti než litina šedá. Konstrukce je zachována stejná jako u původního příčnicku, je zvětšena pouze šířka. Bylo by tedy možné využít některých částí původních modelů pro nový odlitek.

Protože dojde nárůstu rozměrů, zvýší se i objem použitého materiálu. Tím se zvedne hmotnost celého příčnicku a to přibližně o 14% hmotnosti původního stojanu. Zvýší se hmotnost pohyblivých částí stroje, mezi které příčnick patří.

### Saně

Pohyblivá část stroje, která umožňuje pohyb vřeteníku ve vodorovném směru osy X může být zachována téměř beze změn. V ose X bude pojíždět po delším vedení, což na samotné saně nemá vliv.

Saně jsou vyrobeny jako odlitek a stejně jako na příčnick, je i na ně použito tvárné litiny. Rozměry nejsou měněny a tak i hmotnost zůstává zachována jako u původních saní.



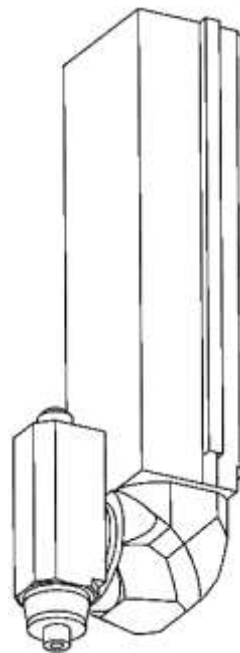
Obr. 4.15 Saně

### Smykadlo

Tato pohyblivá část zůstává navenek nezměněna. Vnější rozměry u smykadla pro novou koncepci jsou stejné jako u původního stroje. V původním smykadle je umístěno pouze vřetenem oproti nové koncepci, ve které je na smykadle připevněna frézovací otočná hlava. Tato hlava je však z velké zakomponována uvnitř smykadla v původním prostoru na vřeteně. Tento prostor se bude zcela jistě muset upravit podle požadavků frézovací hlavy. To je však nutné řešit přímo s dodavatelem jednoosé otočné hlavy.

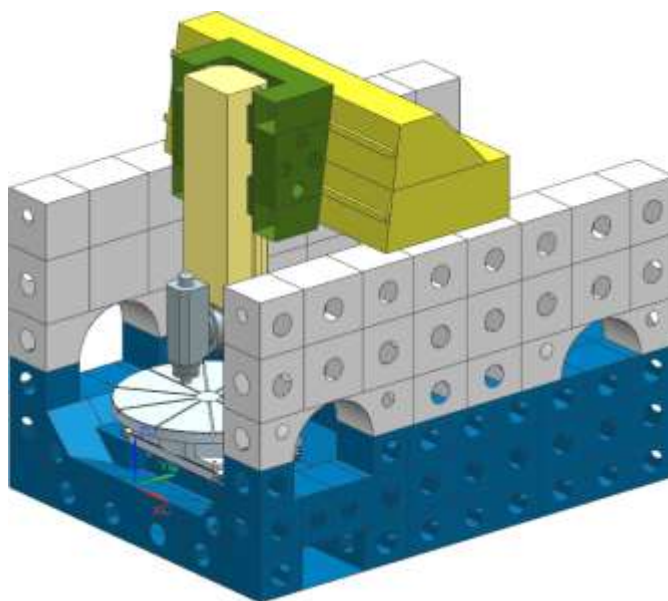


Obr. 4.17 Smykadlo s původním vřetenem



Obr. 4.17 Smykadlo s frézovací hlavou

Sestavením těchto částí se stolem vznikne první varianta nové koncepce (viz obr. 3.18)



Obr. 4.18 Varianta I

#### 4.2.4 Varianta II

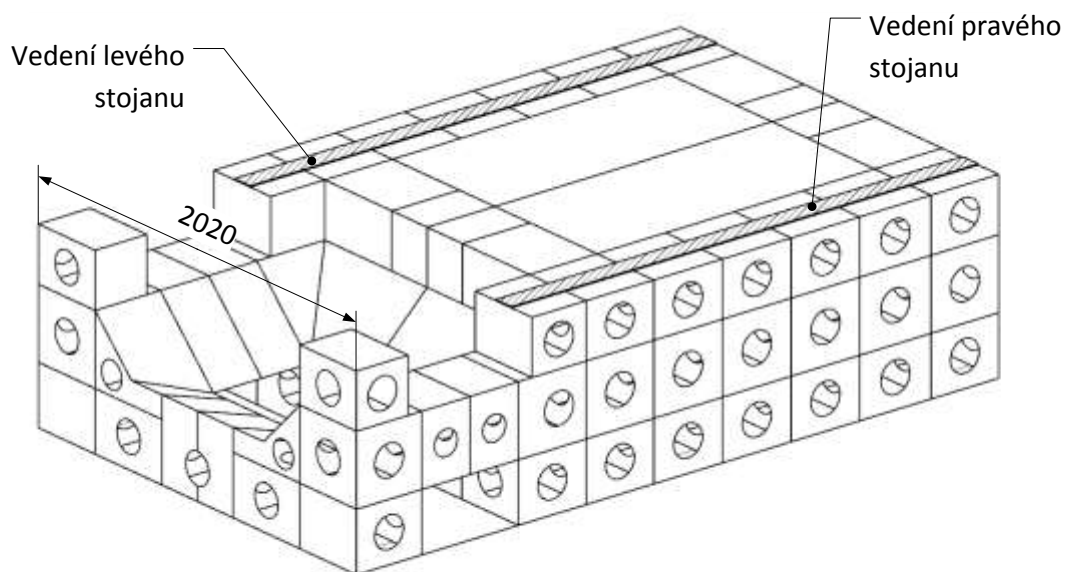
Druhou variantou nové koncepce stroje změnil poměr pohybujících se hmot. I tak je jako předchozí varianta složena z těchto částí:

- Lože
- Stojanů
- Příčnicku
- Saní
- Smykadla

Některé tyto díly mohly zůstat zachovány jako u původního stroje, jiné musely být změněny. Změny jsou takové, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů, uvedených v kapitole 3.1. K nejvýraznější konstrukční změně dochází u stojanů. Jednotlivé části stroje jsou popsány níže i s uvedenými změnami, které je nutné provést.

#### Lože

U této varianty není nutné rozšiřovat celé lože jako u varianty předchozí. Oproti původnímu stroji bude na loži umístěno vedení, na kterém budou uloženy stojany, pojíždějící dopředu a dozadu v ose Y. Toto vedení bude ve stejném místě, kde byly původně po celé délce postaveny stojany.



Obr. 4.19 Lože varianty II

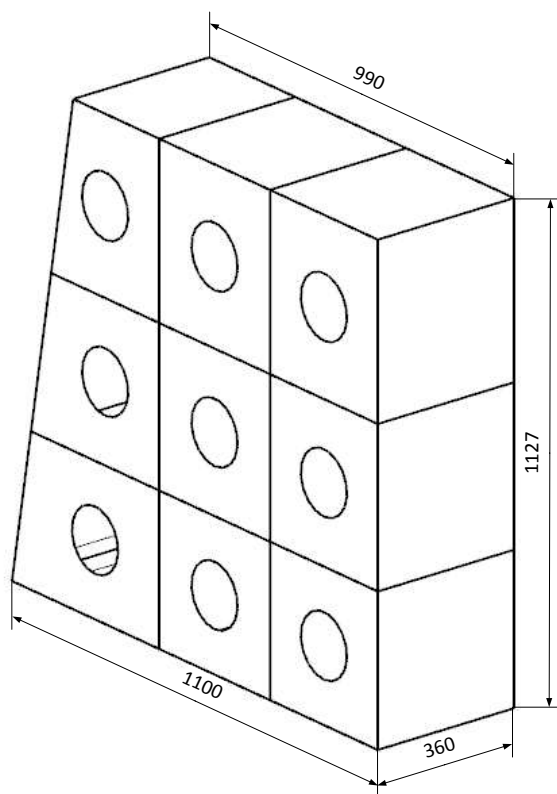
Lože zůstává rozměrově v původním stavu. Plocha, která bude pro stroj vymezena na hale, se tedy nebude výrazně měnit.

Lože je vyrobeno jako odlitek z šedé litiny. Protože nejsou měněny rozměry lože, nenaroste hmotnost a zároveň díky stejné konstrukci bylo by možné využít původních modelů.

### Stojany

Tento díl stroje je výrazně zmenšen. Není pevně spojen s ložem, ale zajišťuje pohyb ve směru osy Y. Vedení, které bylo původně na horním okraji stojanů, je přesunuto na lože a pojíždí po něm stojany nesoucí příčník.

Aby se mohli stojany takto pohybovat po loži, jsou zkráceny. V horní části, kde jsou spojeny s příčníkem, mají na délku rozměr s ním totožný, což je 990mm a v dolní části, kde je umístěno vedení jsou mírně rozšířeny na 1100mm. Výška stojanů je zvýšena z důvodu nižšího položení vřeteníku ve frézovací hlavě. U nové koncepce je vřeteník o 352 mm níže než u původního stroje. Stojany je tedy nutné zvýšit o tuto hodnotu na 1127mm. Šířka stojanů zůstala zachována jako u původní konstrukce.



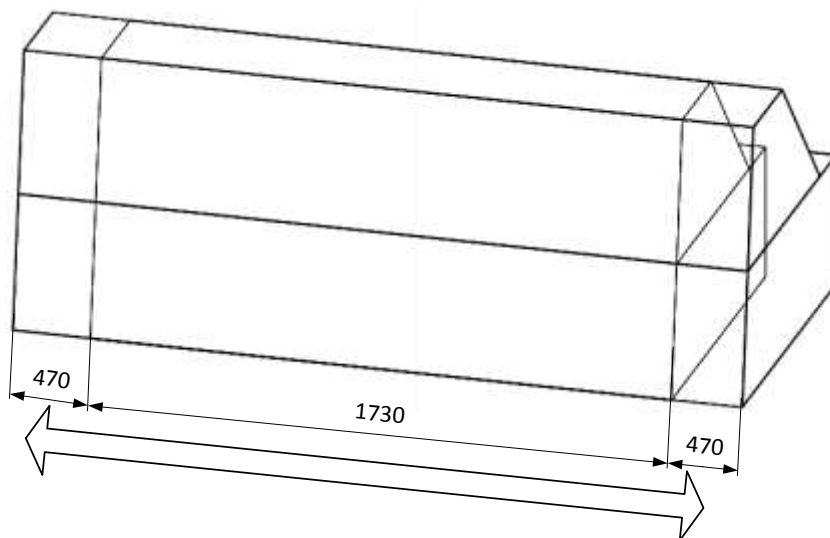
Obr. 4.20 Varianta II stojan

Stojany jsou vyrobeny jako odlitky z šedé litiny. Protože došlo k velkému zmenšení je použito menší množství materiálu. Stojan druhé varianty je proto také výrazně lehčí než u původního stroje. Hmotnost by měla klesnout až na 54% původní hmotnosti stojanu.

### Příčník

Příčník uzavírá portálový rám a spojuje tak stojany. Musí zaručit dostatečnou délku vedení saní, které po něm pojíždějí ve směru osy X. Proto je nutné jeho rozšíření. Konce příčníku přesahují přes stojany, na kterých je postaven. To vzniká z důvodu zachování původní šířky lože.

Pro dostatečný pojezd saní ve směru osy X je nutné příčník rozšířit stejně, jako u první varianty. Nárůst rozměrů je tedy pouze v ose X a to o 470 mm z každé strany. Další rozměry zůstávají zachovány beze změny.



Obr. 4.21 Rozšíření příčníku varianta II

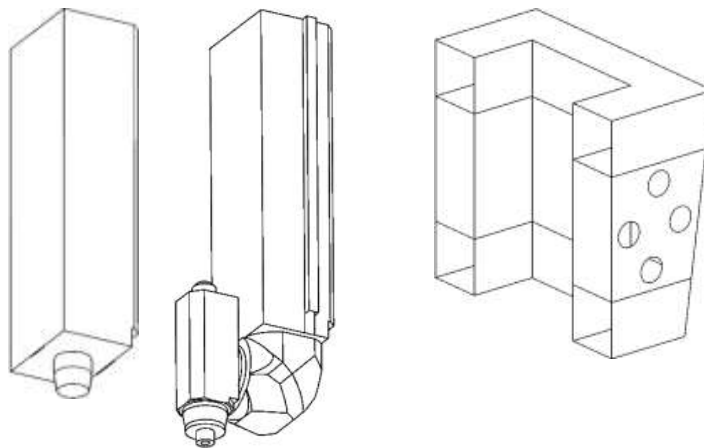
Protože je příčník považován za více namáhanou část stroje, je vyroben z tvárné litiny. Konstrukce je zachována stejná jako u původního příčníku, je zvětšena pouze šířka. Bylo by tedy možné využít některých částí původních modelů pro nový odlitek.

Protože dojde k nárůstu rozměrů, zvýší se i objem použitého materiálu. Tím se zvedne hmotnost celého příčníku a to přibližně o 14% hmotnosti původního stojanu. Zvýší se hmotnost pohyblivých částí stroje, mezi které příčník patří.

Příčník je však jedinou částí druhé varianty nové koncepce, které je takto zvětšena.

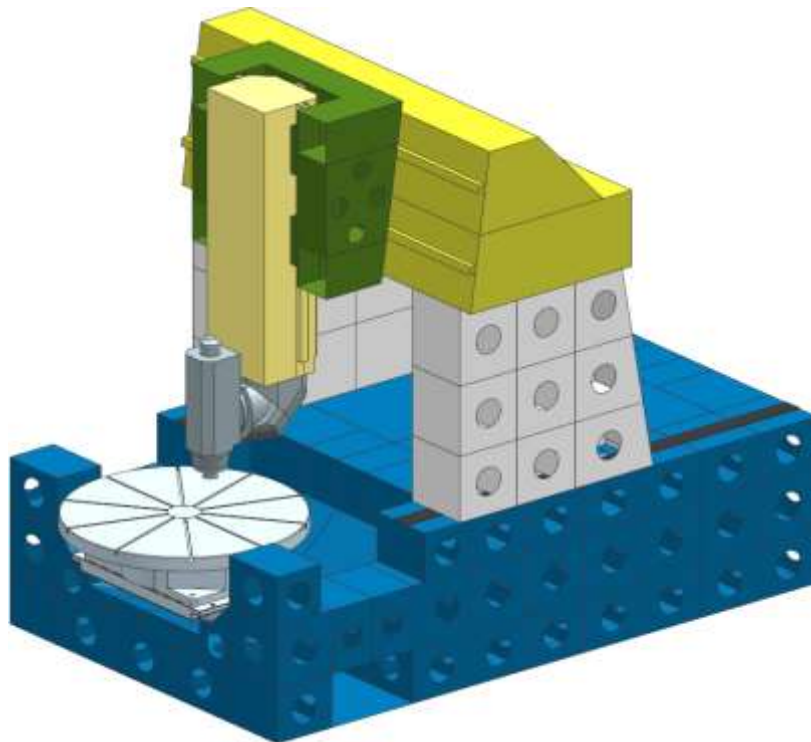
### Saně a smykadlo

Tyto pohyblivé části stroje, které nese na příčník, zůstávají beze změn. Popis je tedy stejný jako u varianty I nové koncepce v předchozí kapitole 3.2.3.



Obr. 4.22 Původní a nové smykadlo, saně

Po sestavení těchto částí se stolem vznikne druhá varianta nové koncepce (viz obr. 3.23).



Obr. 4.23 Varianta II

### 4.3 Hodnocení a výběr optimální varianty

V následující kapitole je z předchozích uvedených variant vybrána optimální pro novou koncepci stroje. Jsou zde vybrány kritéria, podle kterých jsou varianty hodnoceny. Kritéria sledují základní funkčnost stroje a možnost dosažení požadovaných parametrů při obrábění.

Zvolená kritéria:

- Hmotnost pohyblivých částí
- Dynamická stabilita rámu stroje
- Zachování původních částí
- Celková hmotnost stroje

#### 4.3.1 Hmotnost pohyblivých částí

Původní stroj je koncipován tak, že se pohybuje příčník, saně a smykadlo v lineárních osách a stůl zajišťuje obě rotační osy. Jak již bylo řečeno, tato koncepce není vhodná pro obrobky s hmotností větší než 1000kg.

Pro novou koncepci bylo zvoleno rozložení pohybujících se hmot jinak. Lineární osy sice zajišťují pohyb příčníku, saně a smykadla, ale rotační osy byly rozděleny. Osa C na pracovní stůl a osa B na frézovací otočnou hlavu. Z toho důvodu musel být upraven rám, ve kterém se varianty liší.

Varianta I

Tabulka 4-3 Pohyblivé hmotnosti varianta I

Pohyblivé části	Odhad nárůstu nebo poklesu hmotnosti v %
Příčnick	114%
Saně	100%
Smykadlo	100%
Otočný stůl	100%
Frézovací hlava	303%
Celkové zvýšení hmotnosti pohyblivých částí	115%

Varianta II

Tabulka 4-4 Pohyblivé hmotnosti varianta II

Pohyblivé části	Odhad nárůstu nebo poklesu hmotnosti v %
Stojany	54%
Příčnick	114%
Saně	100%
Smykadlo	100%
Otočný stůl	100%
Frézovací hlava	303%
Celkové zvýšení hmotnosti pohyblivých částí	168%

Pohyblivé části stroj MCU 630

Tabulka 4-5 Pohyblivé hmotnosti varianta MCU 630

Pohyblivé části	Hmotnost, ke které jsou vztaženy varianty v %
Příčnick	100% (1400 kg)
Saně	100% (660 kg)
Smykadlo	100% (600 kg)
Otočný stůl	100% (850/2 kg)
Vřeteno	100% (140 kg)
Celková hmotnost pohyblivých částí	100% (3225 kg)

Hmotnosti částí variant jsou vztaženy ke stroji MCU 630. K největšímu nárůstu hmotností pohyblivých částí dochází u druhé varianty. Toto zvýšení způsobeno tím, že mezi pohyblivými částmi přibýly stojany pojíždějící po příčnicku.

U první varianty jde pouze o rozšíření příčnicku, z tohoto hlediska je tato varianta výhodnější.

#### 4.3.2 Dynamická stabilita rámu

Při zkoumání dynamické stability rámu stroje je sledováno, jak je stroj odolný proti kmitání. Pokud je stroj dynamicky nestabilní při obrábění, dochází ke zhoršení tvarové přesnosti a kvality povrchu obráběné plochy. Kmitání má vliv na nástroj, který se může rychleji opotřebovat a mechanicky poškodit, ale i na výkon stroje, který není možné plně využít. [2]

Části, ze kterých se obráběcí stroj skládá, jsou pružná tělesa, která jsou k sobě pružně spojena. Tím vznikne složitý kmitající systém. Pro zjištění jakým způsobem systém kmitá lze využít modální analýzu. Výstupem modální analýzy jsou vlastní frekvence soustavy, vlastní tvary kmitu a vlastní tlumení kmitu. Pomocí modální analýzy lze také hodnotit některé úpravy konstrukce a jejich vliv na tuhost stroje. [2]

##### Modální analýza pomocí metody konečných prvků

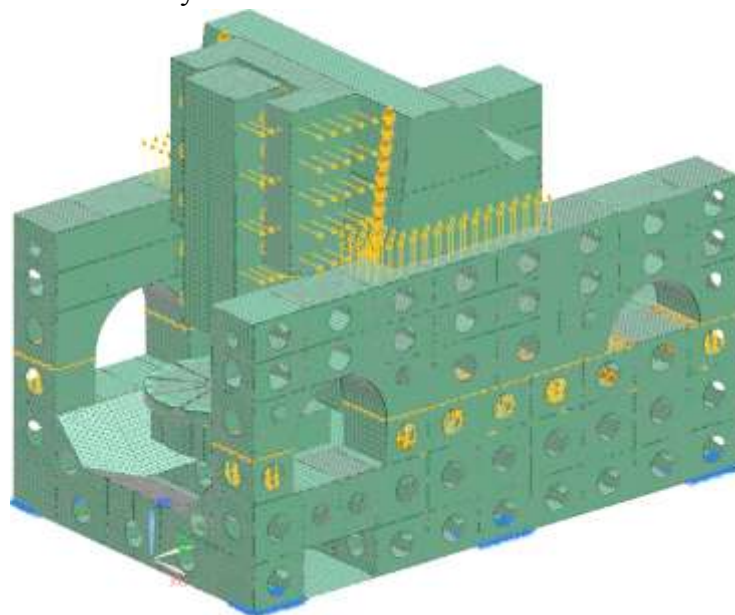
Modální analýzou jsou stanoveny vlastní frekvence a tvary kmitů soustav, které tvoří zjednodušené modely rámu původního stroje a variant nových koncepcí stroje. Podle velikosti vlastní frekvence, či pokud se frekvence a tvar vlastních kmitů blíží k hodnotám původního již vyráběného stroje lze určit, která z variant je dynamicky stabilnější.

Protože nejsou známy konkrétní modely odlitků stroje, je nutné hodnoty vlastních frekvencí porovnávat relativně vůči sobě. Při dalším rozpracování vybrané varianty je možné prvotní model dále optimalizovat a rozpracovat detailní konstrukční řešení odlitků. Touto optimalizací lze pak dosáhnout požadovaných vlastností konstrukce.

##### Výpočtový 3D model

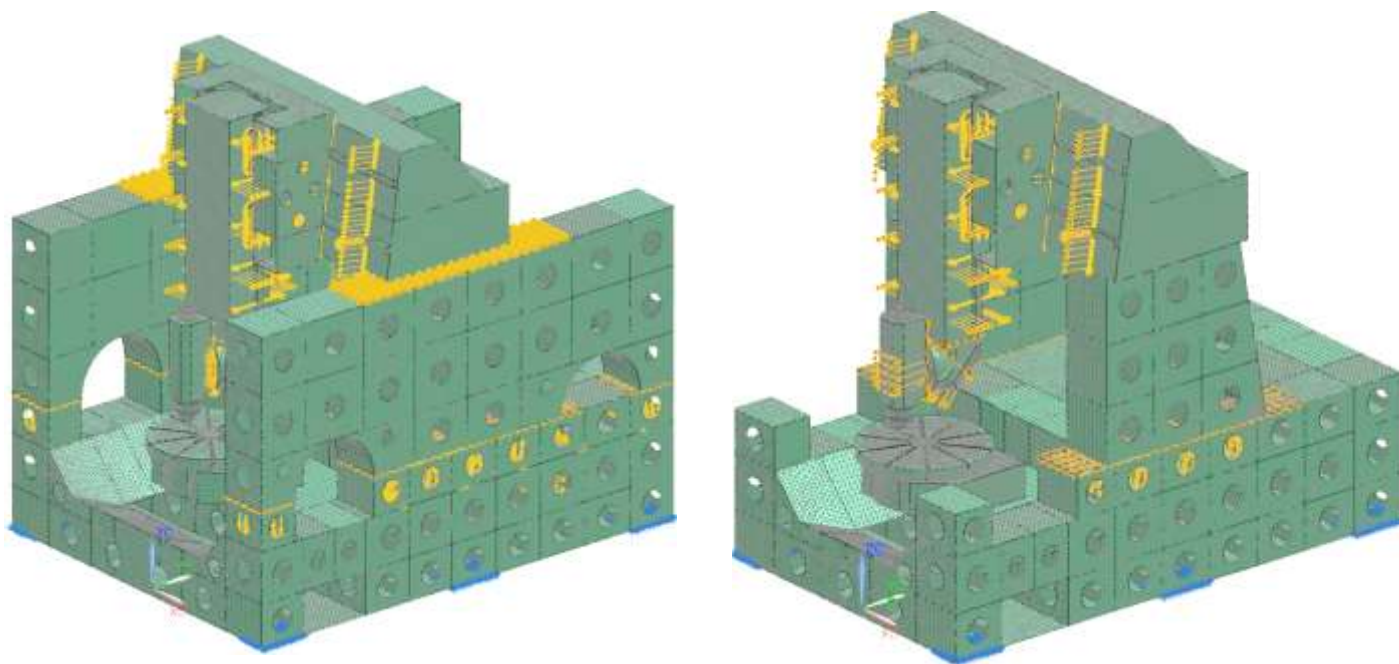
Pro vytvoření výpočtových modelů pro MKP výpočet, je využito plošných modelů rámu původního stroje, varianty I a varianty II nové koncepce. Modely jsou plošné, protože rám stroje je složen z tenkostěnných odlitků. K vytvoření sítě konečných prvků je vhodné použít 2D prvky, kterým je přiřazen materiál a správná tloušťka stěny. Byly použity trojúhelníkové prvky CTRIA6 s šesti uzly. Ne všechny části sestavy jsou ze stejného materiálu, sítě jednotlivých dílů byly proto vytvořeny zvlášť.

Mezi tělesy je definován kontakt pomocí funkce Face Gluing, což zajistí vzájemné působení těles na sebe a sestava se nerozpadne. Stroj je ukotven k podlaze v šesti místech, na modelu jsou v těchto místech definovány okrajové podmínky, které znemožňují pohyb v osách X, Y a Z a rotaci kolem těchto os. Modely na obrázcích 3.24 a 3.25.



Obr. 4.24 Výpočtový model původního stroje





Obr. 4.25 Výpočtové modely varianty I (vlevo) a varianty II (vpravo)

### Výsledky výpočtu

Výpočtem bylo stanoveno několik vlastních frekvencí rámu stroje a tvary kmitů při těchto frekvencích. Tvary kmitů si jsou velmi podobné pro všechny tři koncepce stroje. Vznikají však při jiných hodnotách vlastních frekvencí. Jsou vybrány dva tvary kmitu, které mají nejnižší hodnoty vlastních frekvencí pro původní rám. K nim jsou přiřazeny totožné tvary kmitů nových koncepcí a porovnány hodnoty vlastních frekvencí. Konkrétní hodnoty pro všechny tři koncepce jsou uvedené v následující tabulce:

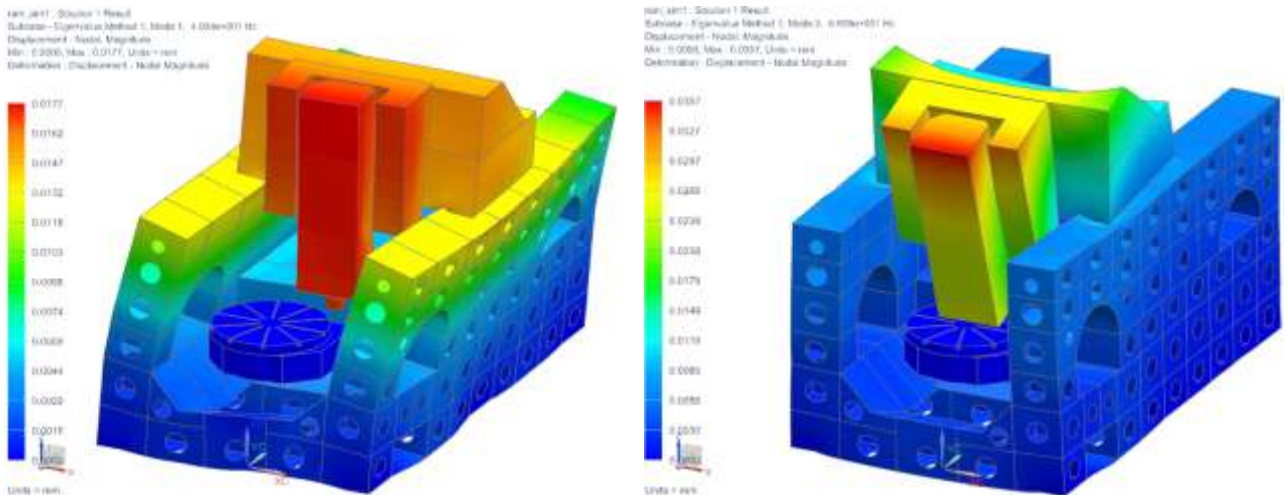
Tabulka 4-6 Hodnoty vlastních frekvencí

Koncepce stroje	Frekvence při tvaru kmitu	
	Tvar A	Tvar B
Původní rám	49 Hz	66 Hz
Varianta I	38 Hz	23Hz
Varianta II	41 Hz	31 Hz

Nižší frekvence nových koncepcí může být způsobena většími rozměry a větším podílem hmoty v tělesech. Pokud se zvětšuje délka tělesa, které kmitá, dochází ke snižování frekvence těchto kmitů. Při zkracování naopak hodnota frekvence narůstá.

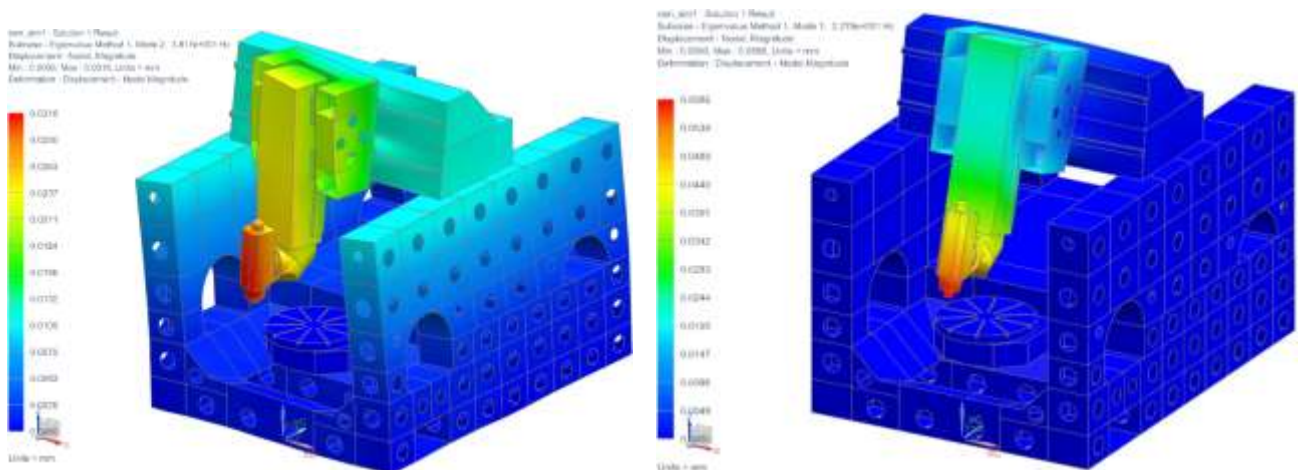
Na následujících obrázcích (obr. 3.26 až 3.28) jsou znázorněny tvary kmitů pro jednotlivé koncepce a hodnoty vlastních frekvencí.

### Původní rám



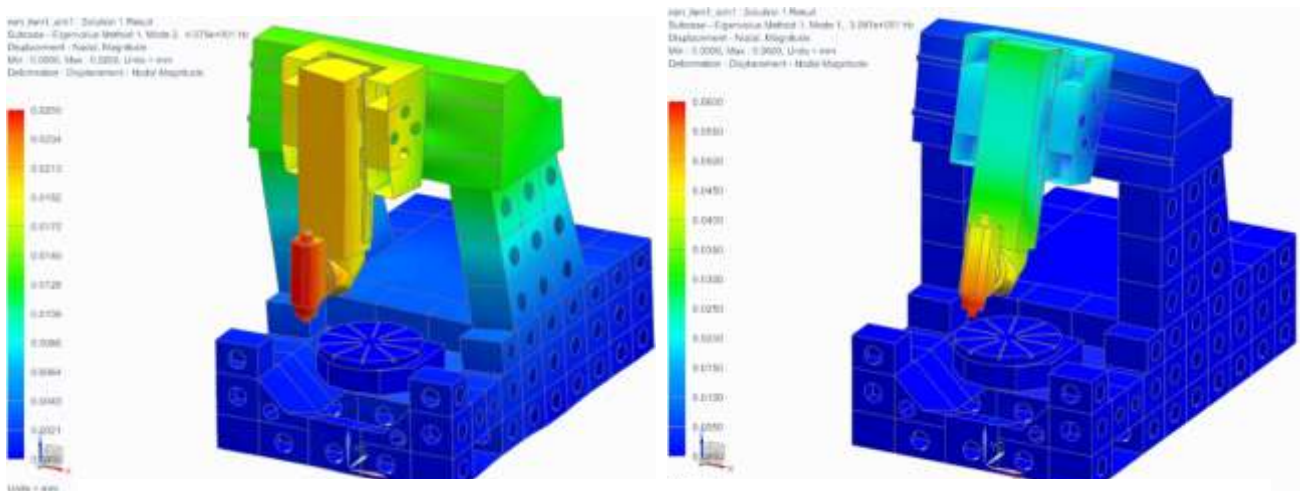
Obr. 4.26 Vlevo tvar A 49 Hz, vpravo tvar B 66 Hz

### Varianta I



Obr. 4.27 Vlevo tvar A 38 Hz, vpravo tvar B 23 Hz

### Varianta II



Obr. 4.28 Vlevo tvar A 41Hz, vpravo Tvar B 31 Hz

Z obrázků je zřejmé, ve kterých směrech je stroj náchylný ke vzniku kmitavého pohybu. Nové koncepce stroje by bylo nutné v dalším rozpracování optimalizovat, aby bylo dosaženo hodnoty vlastních frekvencí jako u původního řešení stroje. To je také nutné ověřit praktickým experimentem, který výsledky modální analýzy potvrdí nebo vyvrátí a podle toho pak se dále zabývat tímto jevem na obráběcím stroji.

Pro hodnocení varianty I a II v tomto případě postačí porovnání vlastních frekvencí na základě toho, jak se blíží k původní koncepci stroje. Dynamicky stabilnější je varianta II, která dosahuje pro oba tvary kmitů větších hodnot vlastních frekvencí.

#### 4.3.3 Zachování původních částí

Protože firma již vyrábí stroj, který správně pracuje a splňuje požadavky zákazníků a nový stroj je pouze zvětšením stroje stávajícího, je stanoveno jako další kritérium dědičnost konstrukce. V této kapitole je hodnoceno, kolik původních částí stroje je použito pro novou koncepci.

##### Varianta I

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.3, kde byla varianta I detailně popsána, dochází zde k několika změnám. Některé změny jsou pro obě varianty stejné, například nový otočný stůl a frézovací hlava. Změny odlítků a vedení jsou ale na každé variantě trochu odlišné a lze proto posoudit, která varianta využije více původních částí

Varianta I:

- Rozšíření lože
- Zvýšení stojanů
- Rozšíření příčnicku
- Prodloužení vedení osy X

Varianta II

- Změna stojanů
- Rozšíření příčnicku
- Prodloužení vedení osy X
- Přenesení vedení osy Y pod stojany

U obou variant je stejná změna příčnicku a vedení v ose X. Druhá varianta zachovává lože, ale dochází k větší změně stojanů a navíc se přesouvá osa Y pod stojany. Lze tedy říci, že dědičnost konstrukce je u obou variant na velmi podobné úrovni.

#### 4.3.4 Celková hmotnost stroje

Protože u variant nové koncepce řešení se změnila celková rozměry, pravděpodobně se změnila i celková hmotnost. A to u každé varianty jinak, jako tomu bylo u hmotnosti pohyblivých částí. Celková hmotnost je určována z následujících částí stroje:

- Lože
- Stojany
- Příčník
- Saně
- Smykadlo
- Pracovní stůl
- Vřetenno nebo frézovací hlava

Varianta I

Tabulka 4-7 Celková hmotnost varianty I

Pohyblivé části	Odhad nárůstu nebo poklesu hmotnosti v %
Lože	114%
Stojan (2x)	134%
Příčnick	114%
Saně	100%
Smykadlo	100%
Otočný stůl	74%
Frézovací hlava	303%
Celkové zvýšení hmotnosti	117%

Varianta II

Tabulka 4-8 Celková hmotnost varianty II

Pohyblivé části	Odhad nárůstu nebo poklesu hmotnosti v %
Lože	100%
Stojany	54%
Příčnick	114%
Saně	100%
Smykadlo	100%
Otočný stůl	74%
Frézovací hlava	303%
Celkové snížení hmotnosti	90%

Pohyblivé části stroj MCU 630

Tabulka 4-9 Celková hmotnost varianty MCU 630

Pohyblivé části	Hmotnost, ke které jsou vztaženy varianty v %
Lože	100% (5700 kg)
Stojany	100% (1600 kg)
Příčnick	100% (1400 kg)
Saně	100% (660 kg)
Smykadlo	100% (600 kg)
Otočný „kolébkový“ stůl	100% (850 kg)
Vřeteno	100% (140 kg)
Celková hmotnost	100% (12550 kg)

Hmotnosti variant jsou vztaženy ke stroji MCU. K největšímu nárůstu hmotnosti dochází u první varianty. Toto zvýšení je způsobeno tím, že jsou zvětšeny rozměry tří částí koncepce, příčnicku, lože a stojanů. U druhé varianty je lože zachováno, rozšířen je pouze příčnick a stojany jsou zmenšeny, tím je dosaženo menší hmotnosti než u původního stroje.

Z hlediska celkové hmotnosti a spotřeby materiálu na odlitky je vhodnější druhá varianta, která je nejen lehčí než varianta první, ale i než původní stroj.

#### 4.3.5 Celkové hodnocení variant

Přidělení vah jednotlivým kritériím:

Tabulka 4-10 Váhy kritérií

	Kritérium	Body	Váhy
K <sub>1</sub>	dynamická stabilita A	3	0,3
K <sub>2</sub>	dynamická stabilita B	3	0,3
K <sub>3</sub>	hmotnost pohyblivých částí	2	0,2
K <sub>4</sub>	zachování původních částí	1	0,1
K <sub>5</sub>	celková hmotnost	1	0,1
celkem		10	1

Navržená bodovací stupnice:

Tabulka 4-11 Bodovací stupnice

Body	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>
1	méně než 39 Hz	méně než 39 Hz	více než 120%	žádná	více než 120%
2	40 - 60 Hz	40 - 60 Hz	100 – 120%	částečná	100 – 120%
3	více než 60 Hz	více než 60 Hz	méně než 100%	úplná	méně než 100%

Hodnoty kritérií jsou voleny s přihlédnutím na původní koncepci stroje.

Hodnoty kritérií jednotlivých variant

Tabulka 4-12 Hodnoty kritérií

Varianta	Kritéria				
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>
I	38 Hz	23 Hz	115%	částečná	117%
II	41 Hz	31 Hz	168%	částečná	90%

Na základě bodovací stupnice je každému kritériu přidělen počet bodů. Po sečtení bodů vynásobených vahami dáno pořadí dle následující tabulky:

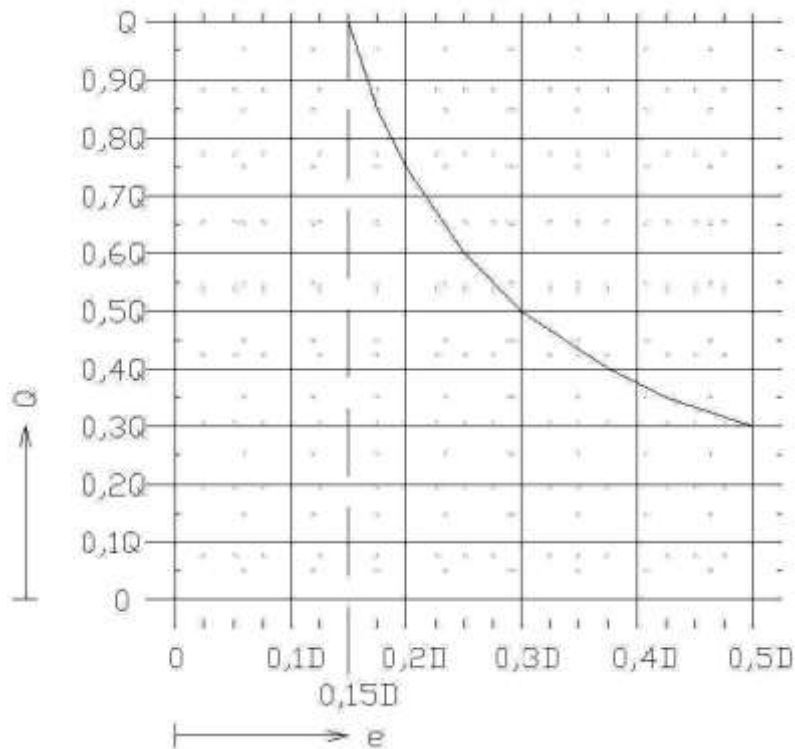
Tabulka 4-13 Vyhodnocení variant

Varianta	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	Body	Pořadí
I	1	1	2	2	2	1,4	2.
II	2	1	1	2	3	1,6	1.
Váhy	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1		

Dle předchozího hodnocení je vítěznou variantou varianta II.

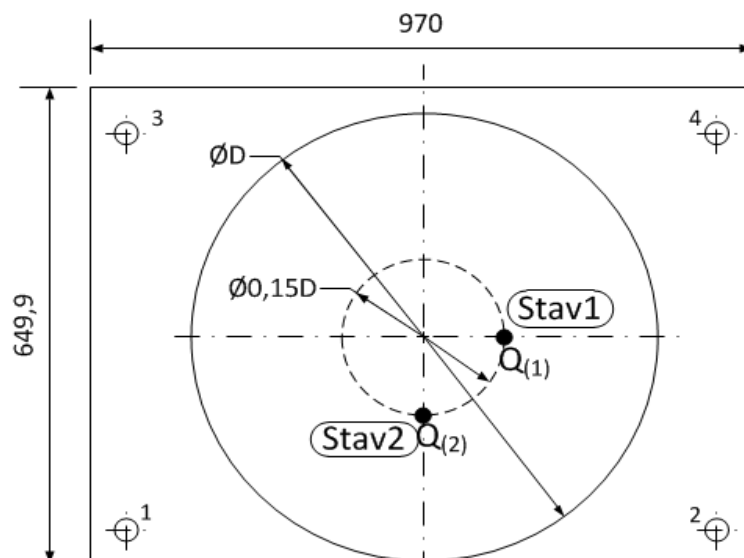
## 5 Kontrola desky pro pracovní stůl

Deska, pomocí které je upevněn pracovní stůl do rámu stroje, je nejvíce namáhána při excentrickém upnutí obrobku na upínací desku stolu. Maximální excentricita pro dané zatížení je stanovena dle následujícího grafu (obr. 4.1,  $Q$  – zatížení,  $e$  – excentricita,  $D$  – průměr upínací desky stolu).



Obr. 5.1 Maximální excentricita při zatížení stolu [9]

Z předchozího grafu vyplývá, že plným zatížením  $Q$  je možné zatížit stůl pouze do excentricity  $0,15 D$ .

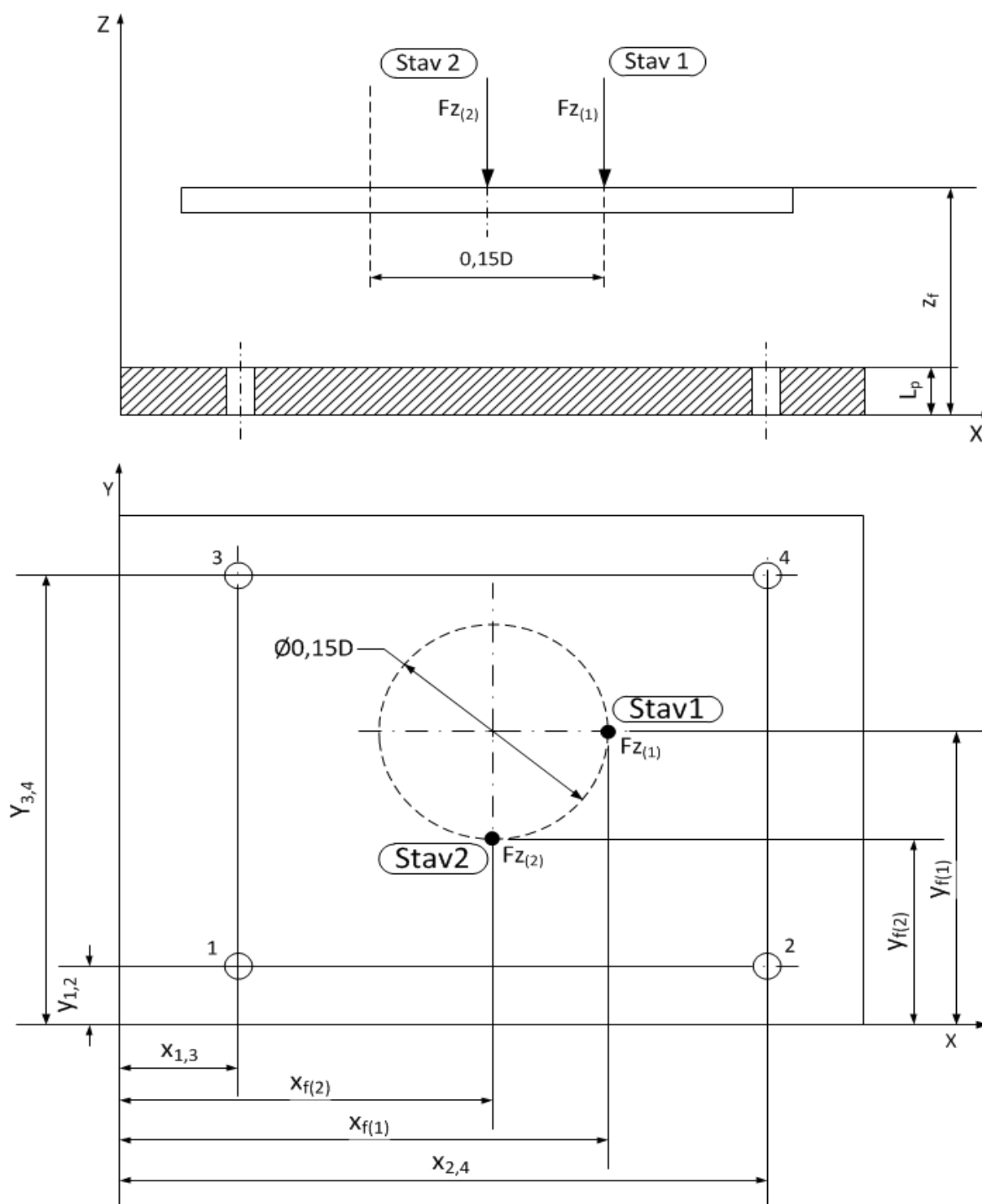


Obr. 5.2 Znázornění stavů zatížení na upínací desce

Výpočet je proveden při maximálním zatížení 2200 kg a při excentricitě 0,15 D (180mm). Hodnoty jsou zjišťovány při dvou stavech (viz obr. 4.2). V prvním stavu je zatížení vlevo od středu stolu a při druhém dojde k pootočení o 90°. Střed kruhové upínací desky není ve středu obdélníkové desky pro ukotvení stolu. Díry 1 až čtyři jsou místa upevnění stolu na desku, do těchto míst je přeneseno zatížení z upínací desky.

Síly v těchto míste jsou vypočteny transformací sil. Nejprve je nutné určit sílu zatížení Q.

$$Q = 2200\text{kg} \Rightarrow F_z = 22\text{kN} \quad (F_x = 0\text{kN}, F_y = 0\text{kN})$$



Obr. 5.3 Souřadnice sil a míst upevnění stolu



Souřadnice, do kterých je zatížení přeneseno:

Počet míst :  $n = 4$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$

Tabulka 5-1 Souřadnice

$x_i$	$y_i$	$i$
115	50	1
855	50	2
115	599,5	3
855	599,5	4

Výpočet souřadnic středu obrazce, který tvoří místa zatížení:

$$x_s = \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)}{n}; \quad y_s = \frac{\left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{n}$$

$$x_s = 485mm; \quad y_s = 324,75mm$$

## 5.1 Výpočet sil při stavu 1

Souřadnice vektoru síly  $F_z$ :

$$x_f = 575mm, \quad y_f = 300mm, \quad z_f = 365mm$$

Výpočet momentů v počátku souřadnic X, Y, Z

$$F = (F_x \quad F_y \quad F_z) \quad r = (x_f - x_s \quad y_f - y_s \quad z_f)$$

$$M = r \times F \quad M = (544,5 \quad 1,98 \cdot 10^3 \quad 0)Nm$$

$$M_x = 544,5Nm$$

$$M_y = 1,98 \cdot 10^3 Nm$$

Výpočet sil od momentů  $M_x$  a  $M_y$  v místech 1,2,3,4

$$F_{iMx} = \frac{-M_x \cdot (y_i - y_s)}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_s)^2}, \quad F_{sMx} = (495,45 \quad 495,45 \quad -495,5 \quad -495,5)N$$

$$F_{iMy} = \frac{M_y \cdot (x_i - x_s)}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}, \quad F_{sMy} = (-1338 \quad 1338 \quad -1338 \quad 1338)N$$

$$F_{iz} = \frac{F_z}{n}, \quad F_{iz} = -5500N$$

$$F_i = F_{sMx} + F_{sMy} + F_{sz}$$

$$F_1 = -4658N, \quad F_2 = -7333N, \quad F_3 = -3667N, \quad F_4 = -6342N$$

## 5.2 Výpočet sil při stavu 2

Souřadnice vektoru síly  $F_z$ :

$$x_f = 485\text{mm}, y_f = 210\text{mm}, z_f = 365\text{mm}$$

Výpočet momentů v počátku souřadnic X, Y, Z

$$F = (F_x \quad F_y \quad F_z) \quad r = (x_F - x_s \quad y_F - y_s \quad z_F)$$

$$M = r \times F \quad M = (2525 \quad 0 \quad 0)\text{Nm}$$

$$M_x = 2525\text{Nm}$$

Výpočet sil od momentů  $M_x$  a  $M_y$  v místech 1,2,3,4

$$F_{iM_x} = \frac{-M_x \cdot (y_i - y_s)}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_s)^2}, \quad F_{sM_x} = (2297 \quad 2297 \quad -2297 \quad -2297)\text{N}$$

$$F_{iM_y} = 0\text{N}$$

$$F_{iz} = \frac{F_z}{n}, \quad F_{iz} = -5500\text{N}$$

$$F_i = F_{sM_x} + F_{sM_y} + F_{sz}$$

$$F_1 = -7797\text{N}, F_2 = -7797\text{N}, F_3 = -3203\text{N}, F_4 = -3203\text{N}$$

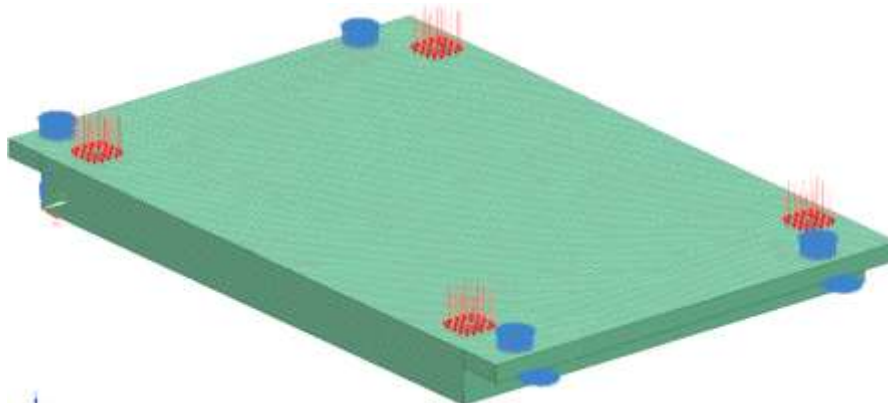
Zatížení působí ve středu šířky desky, síly jsou proto symetrické podle roviny YZ.

## 5.3 Výpočet deformací desky pomocí MKP

### 5.3.1 Výpočtový 3D model

Model je vytvořen z původního objemového modelu desky pomocí 3D prvků CTETRA10, kterým jsou přiděleny vlastnosti tvárné litiny. Velikost prvků se pohybuje okolo 10mm podle složitosti částí modelů. Okrajové podmínky jsou definovány v místech působení sil a v místech, kde je deska připevněna k rámu stroje (viz obr. 4.4). V místech, kde je deska připevněna k rámu stroje jsou zakázány pohyby v osách X, Y a Z a rotace kolem těchto os.

Model je totožný pro oba stavy zatěžování, mění se pouze hodnota sil dle předchozího výpočtu.

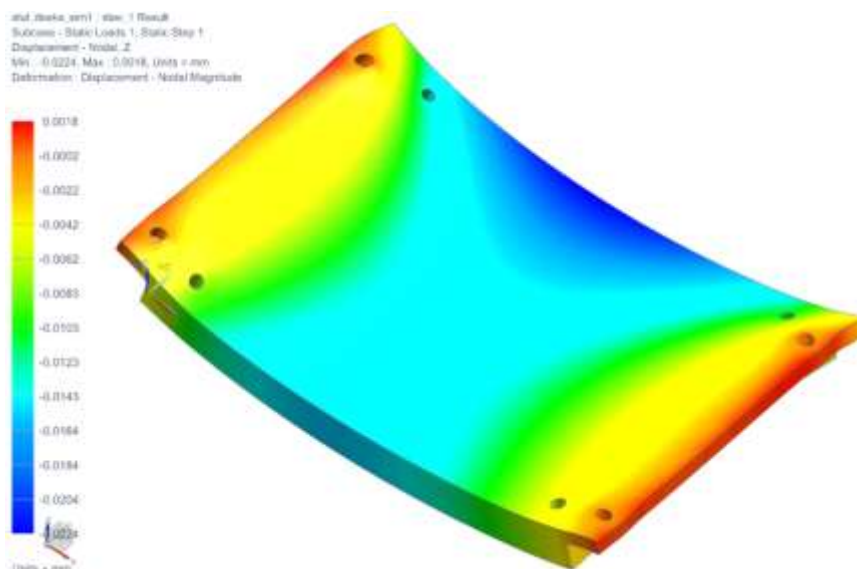


Obr. 5.4 Výpočtový model desky

Výsledky výpočtu

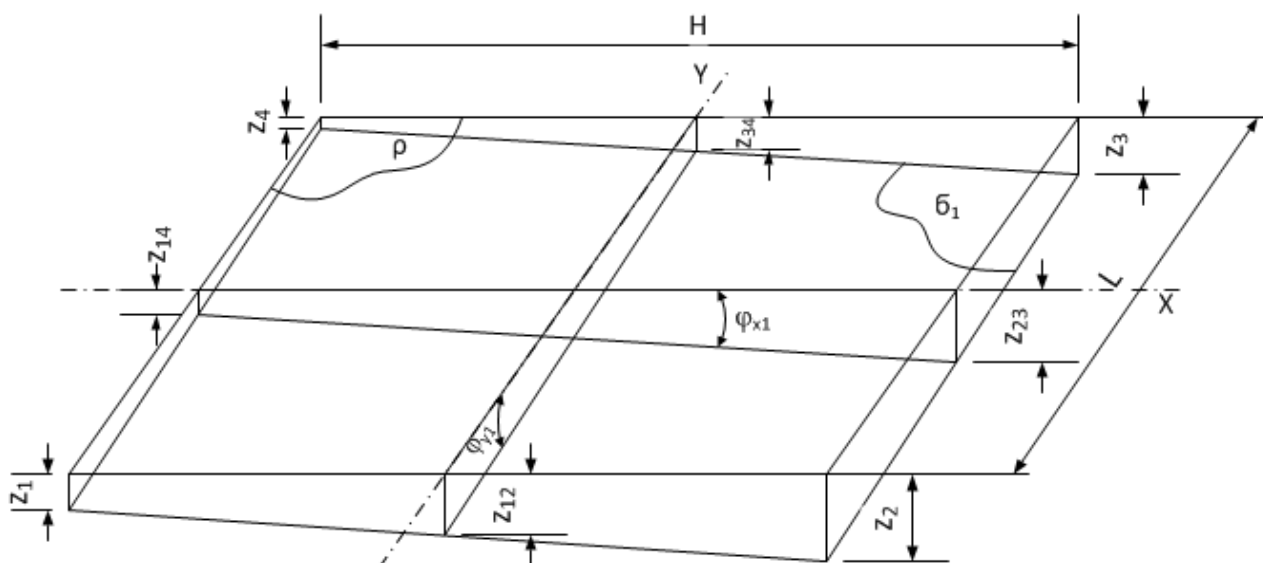
1. Stav 1 – excentricita zatížení v místě 1

Vlivem zatížení dojde k deformacím na celé ploše desky, zásadní pro polohu upínací desky jsou deformace ve směru osy Z, které vznikají v místě upevnění stolu 1, 2, 3, 4 (viz obr. 4.2). Na následujícím obrázku 4.5 jsou znázorněny deformace celé desky.



Obr. 5.5 Deformace první stav zatížení

Z modelu jsou odměřeny hodnoty deformací pro místa 1, 2, 3, 4 a jsou odečteny od referenční roviny  $\rho$  rovnoběžnou s výchozí rovinou upínací desky. Tím jsou získány body, kterými prochází skloněná rovina  $\sigma_1$  při prvním stavu zatížení stolu. Z těchto bodů jsou vybrány tři tak, aby bylo možné zkonstruovat rovinu  $\sigma_1$  a zároveň úhly naklonění  $\varphi_{x1}$  a  $\varphi_{y1}$  byly co největší. V grafickém provedení dle obrázku 4.6 jsou odečteny hodnoty  $z$  (viz tabulka 4-2).



Obr. 5.6 Naklonění roviny  $\sigma_1$

Tabulka 5-2 Hodnoty posunutí z stav 1

	Hodnota posunutí od roviny $\rho$ v mm
$z_1$	0,010
$z_2$	0,013
$z_3$	0,006
$z_4$	0,008
$z_{12}$	0,011864
$z_{23}$	0,011466
$z_{34}$	0,007136
$z_{14}$	0,007534

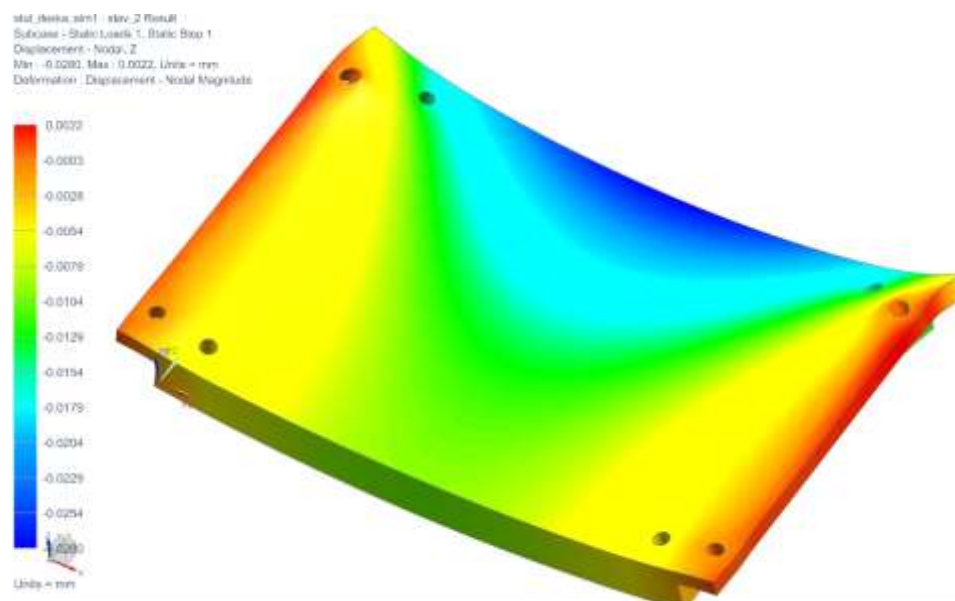
Z těchto hodnot lze vypočítat úhly  $\varphi_{x1}$  a  $\varphi_{y1}$  naklonění roviny  $\sigma_1$ :

$$\varphi_{x1} = \arctg\left(\frac{z_{bc} - z_{ad}}{L}\right) = \arctg\left(\frac{0,011466 - 0,007534}{740}\right) = 5,314 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

$$\varphi_{y1} = \arctg\left(\frac{z_{ab} - z_{cd}}{H}\right) = \arctg\left(\frac{0,011864 - 0,007136}{549,5}\right) = 8,604 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

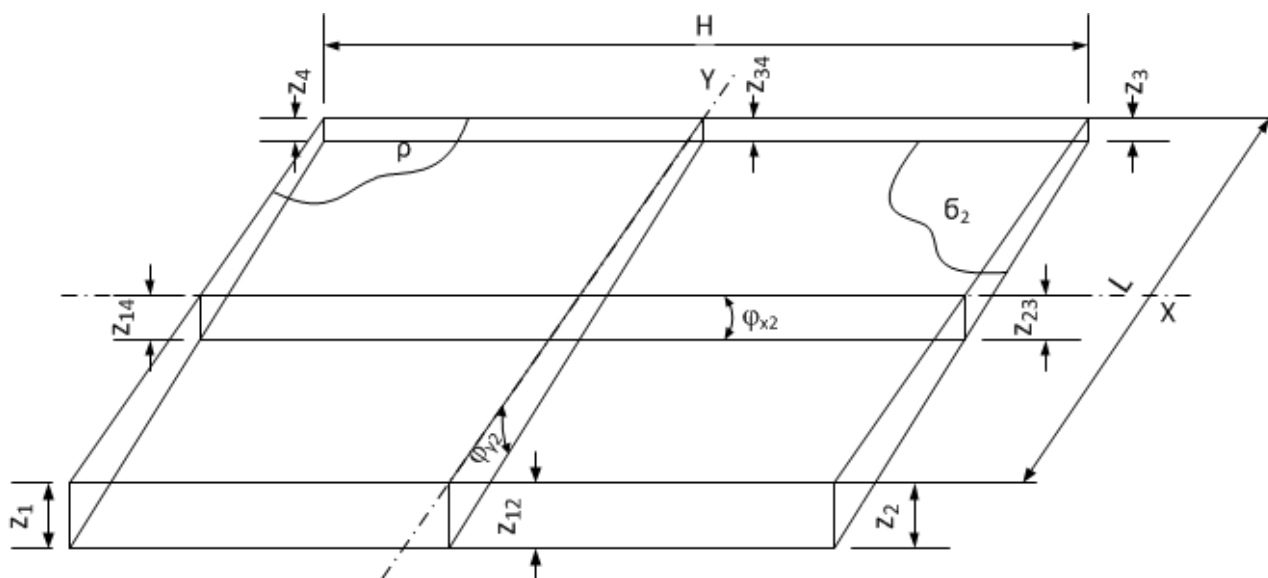
## 2. Stav 2 – excentricita zatížení v místě 2

Výsledky při druhém stavu zatížení jsou velmi podobné prvnímu stavu, protože jsou síly symetrické podle roviny YZ stejně jako místa uchycení desky, jsou takto symetrické i deformace. Následující obrázek 4.7 zobrazuje deformace celé desky.



Obr. 5.7 Deformace druhý stav zatížení

Z modelu jsou odměřeny hodnoty deformací pro místa 1, 2, 3, 4 a jsou odečteny od referenční roviny  $\rho$  rovnoběžnou s výchozí rovinou upínací desky. Tím jsou získány body, kterými prochází skloněná rovina  $\sigma_2$  při prvním stavu zatížení stolu. Z těchto bodů jsou vybrány tři tak, aby bylo možné zkonstruovat rovinu  $\sigma_2$  a zároveň úhly naklonění  $\varphi_{x2}$  a  $\varphi_{y2}$  byly co největší. V grafickém provedení dle obrázku 4.8 jsou odečteny hodnoty  $z$  (viz tabulka 4-3).



Obr. 5.8 Naklonění roviny  $\sigma_2$

Tabulka 5-3 Hodnoty posunutí z stav 2

	Hodnota posunutí od roviny $\rho$ v mm
$z_1$	0,014
$z_2$	0,014
$z_3$	0,004
$z_4$	0,004
$z_{12}$	0,0149
$z_{23}$	0,009
$z_{34}$	0,0031
$z_{14}$	0,009

Výpočet úhlu Z těchto hodnot lze vypočítat úhly  $\varphi_{x2}$  a  $\varphi_{y2}$  naklonění roviny  $\sigma_2$ :

$$\varphi_{x2} = \arctg\left(\frac{z_{bc} - z_{ad}}{L}\right) = \arctg\left(\frac{0,009 - 0,009}{740}\right) = 0 \text{ rad}$$

$$\varphi_{y2} = \arctg\left(\frac{z_{ab} - z_{cd}}{H}\right) = \arctg\left(\frac{0,01491 - 0,00309}{549,5}\right) = 2,151 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

### 5.3.2 Vyhodnocení zjištěných úhlů naklonění

V předešlém výpočtu je z důvodu zjednodušení a z důvodu neznámé konstrukce otočného stolu uvažováno celé těleso stolu jako nekonečně tuhé. Upínací deska stolu se tedy naklání stejně jako deska, na které je stůl připevněn.

Změna úhlu  $\Delta\phi_x$  a  $\Delta\phi_y$  naklonění desky při potočení z místa 1 do místa 2:

$$\Delta\phi_x = |\varphi_{x1} - \varphi_{x2}| = |5,314 \cdot 10^{-6} - 0| = 5,314 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

$$\Delta\phi_y = |\varphi_{y1} - \varphi_{y2}| = |8,604 \cdot 10^{-6} - 2,151 \cdot 10^{-5}| = 1,2906 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

Dle normy DIN 7620 Teil 3 číslo testu G2 je dána tolerance naklonění desky otočných stolů při excentrickém zatížení 0,02 – 0,04 mm na 1000 mm.

Maximální dovolený úhel  $\phi_{dov}$ :

$$\phi_{dov} = \arctg\left(\frac{0,03}{1000}\right) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

$$\phi_{dov} \leq \varphi_{x1}$$

$$\phi_{dov} \leq \varphi_{x2} \Rightarrow \text{Deska pro uložení stolu dle}$$

$$\phi_{dov} \leq \varphi_{y1} \Rightarrow \text{normy DIN 7620 Teil 3 vyhovuje}$$

$$\phi_{dov} \leq \varphi_{y2}$$

Upevnění stolu na navrženou desku může být provedeno. Deformace, které vzniknou při excentrickém upnutí obrobku, ovlivní jeho obrobení v přijatelné míře.

## 6 Technickoekonomické hodnocení

### 6.1 Technické hodnocení

Nová koncepce stroje je navržena tak, aby dosahovala požadovaných parametrů dle tabulky 3-1. Vychází přitom z původního řešení stroje a velmi se přibližuje jeho vlastnostem. Přestože byly provedeny změny upravující rám, z provedených analýz vyplývá, že nový stroj bude obrábět ve stejné kvalitě. Z technického hlediska je právě tento aspekt nejdůležitější, a bylo cílem dosáhnout vyšší kvality se zachováním vlastností koncepce původní.

Pro dosažení těchto vlastností bylo nutné provést nejen změny na odlitcích, které jsou vyráběny výrobcem stroje, ale i změny vedení, pracovního stolu a frézovací hlavy, které jsou výrobcem nakupovány jako montážní skupiny. Zmíněné zásahy však radikálně nemění vlastnosti stroje.

Přehled provedených zásahů do konstrukce:

- Změna odlitků stojanů
- Rozšíření odlitku příčnicku
- Prodloužení vedení v ose X
- Přesun vedení v ose Y pod stojany
- Použití frézovací otočné hlavy (přesun jedné rotační osy z „kolébkového stolu“)
- Použití otočného pracovního stolu (přesun jedné rotační osy z „kolébkového stolu“)
- 

Protože ani první varianta řešení není zavržení hodná, i když její vlastnosti dle kritérií v kapitole 3.3.5 jsou horší, je zde uveden alespoň přehled provedených zásahů do konstrukce pro porovnání s předchozí druhou variantou:

- Změna odlitku lože
- Prodloužení a zvýšení odlitků stojanů
- Rozšíření příčnicku
- Prodloužení vedení v ose X
- Použití frézovací otočné hlavy (přesun jedné rotační osy z „kolébkového stolu“)
- Použití otočného pracovního stolu (přesun jedné rotační osy z „kolébkového stolu“)

### 6.2 Ekonomické hodnocení

Stroj se skládá z dílů, jež jsou výrobcem nakupovány a z dílů výrobcem přímo vyráběných. Proto je ekonomické hodnocení rozděleno na dvě části. Nejdříve je pohled směřován k hodnocení ceny nakupovaných představitelů použitých montážních celků. Druhý pohled je směřován k hodnocení cen vybraných vyráběných představitelů montážních skupin.

V ekonomickém hodnocení jsou zahrnuty ceny původního konceptu stroje MCU 630 a odhad cen pro variantu I a variantu II nové koncepce stroje.

Představitelé nakupovaných montážních skupin jsou v tabulce 5-1 s uvedenými cenami poskytnutými zadavatelem práce.

Tabulka 6-1 Ceny nakupovaných montážních skupin

Montážní skupina	Původní cena v Kč	Cena v Kč – varianta I	Cena v Kč – varianta II
Pracovní stůl	1 635 000,-	1 000 000,-	1 000 000,-
Vřeteno (frézovací hlava)	274 000,-	950 000,-	950 000,-
Posuv osa X	24 000,-	36 000,-	36 000,-
Posuv osa Y	36 000,- (2x)	36 000,- (2x)	36 000,- (2x)
Posuv osa Z	30 000,-	30 000,-	30 000,-
Pohon os bez motoru	1 400,-	1 400,-	1 400,-
Paket Heidenhain*	876 000,-	876 000,-	876 000,-
Celkem	2 912 400,-	2 965 400,-	2 965 400,-

\*paket Heidenhain – sada elektro částí pohonů (systém, motory, kabely, atd.)

Cena prodloužené osy X byla odhadnuta v závislosti na prodloužení, které je z 1 710 mm na 2 650 mm. Cena pracovního stolu byla odhadnuta s ohledem na odstranění dvou prstencových motorů potřebných k naklápění a jednodušší konstrukci stolu. Cena frézovací hlavy zahrnuje vřeteno a odhad cen nových dílů včetně pohonu otáčení. Přesná cena může být stanovena až po jednání s dodavatelem, který frézovací hlavu bude vyrábět.

Tabulka 6-2 Paket Heidenhain (některé komponenty)

Komponenta	cena v EUR
Motor osy X	1 800,-
Motor osy Y <sub>1</sub>	1 800,-
Motor osy Y <sub>2</sub>	1 800,-
Motor osy Z s brzdou	2 000,-
Měniče (společné pro dva motory – 2ks na stroji)	2 800,-

Představitelé vyráběných montážních skupin jsou v tabulce 5-3 s uvedenými cenami poskytnutými zadavatelem práce.

Tabulka 6-3 Představitelé vyráběných montážních skupin (odlitky)

Montážní skupina	Původní cena v Kč	Cena v Kč – varianta I	Cena v Kč – varianta II
Lože	193 000,-	220 020,-	193 000,-
Stojan	84 000,-	112 560,-	45 360,-
Stojan	84 000,-	112 560,-	45 360,-
Příčník	109 000,-	124 260,-	124 260,-
Saně	64 000,-	64 000,-	64 000,-
Smykadlo	70 000,-	70 000,-	70 000,-
Celkem	604 000,-	703 400,-	541 980,-



Protože není známa detailní konstrukce ani pracnost jednotlivých odlitků, cena byla odhadnuta dle nárůstu hmotnosti odlitků. S nárůstem hmotnosti dochází k větší spotřebě materiálu a lze proto uvažovat vyšší cenu odlitků.

Celková cena všech montážních skupin:

Tabulka 6-4 Celková cena montážních skupin

	Původní cena v Kč	Cena v Kč – varianta I	Cena v Kč – varianta II
Nakupované	2 912 400	2 965 400	2 965 400
Vyráběné	604 000	703 400	541 980
Celkem	3 516 400	3 668 800	3 507 380

Z pohledu výrobce nová koncepce představuje stroj, který využije mnoho dílů ze stroje, již vyráběného. Tím se sníží nejen náklady na konstrukci celého stroje, ale i náklady na výrobu jednotlivých dílů. Pro zákazníka je potom výkonnější stroj za výhodnější cenu. Postup návrhu se může projevit i na zlevnění servisu a údržby. Protože nová koncepce vychází z používaného stroje, se kterým má firma již zkušenosti. Řešení některých problémů tak může být rychlejší a levnější.

## 7 Závěr

Diplomovou práci lze rozdělit na dvě části. Cílem první části je hodnotit stroje, které dosahují pohybu v pěti osách pomocí „kolébkového“ stolu a stroje, které mají rotační přesunutou jednu rotační osu na vřeten – druhá rotační osa zůstává na pracovním stole, pro možnost svislého soustružení. Toto soustružení je také jedním z porovnávacích kritérií. Pracovní stoly, které mají dvě rotační osy, nedosahují takových výkonů při svislém soustružení, jako stoly pouze otočné. Jako zástupce stroje s „kolébkovým stolem“ je v práci zvolen stroj MCU 630 a zástupce stroje s otočným stolem a frézovací hlavou stroj DMU 100P duoBlock<sup>®</sup>. Na základě porovnání parametrů, kterých dosahují tyto dva stroje a výkonů otočných a „kolébkových“ stolů je stanoven závěr, pro jak veliké obrobky je výhodné použití daných pracovních stolů.

Druhá část práce vychází z předchozího porovnání a jejím cílem je navrhnout novou koncepci stroje, který bude obrábět větší obrobky než původní stroj MCU 630 a jeho charakteristické parametry budou obdobné s konkurenčním strojem (DMU 100P duoBlock<sup>®</sup>). Nejprve jsou vypsány charakteristické parametry nové koncepce stroje. Dále je řešeno jakým způsobem dosáhnout požadovaných parametrů a jaké to přináší změny do stávajícího řešení. V této části jsou využity poznatky získané v rešeršní části a z porovnání strojů s „kolébkovým“ a pouze otočným stolem. V novém konceptu je proto využito jednoosé frézovací hlavy a otočného stolu. Vlivem změn vznikly nové problémy, na které reagují dvě navržené varianty nové koncepce stroje.

V návrhu variant řešení jsou tyto problémy zmíněny a vyřešeny. Jedná se o zvětšení pracovního prostoru stroje, změna délky pojezdů lineárních os, uložení nového stolu a vznik nových zatížení. Protože v práci nebyl dostatek prostoru a není řešena detailní konstrukce jednotlivých částí stroje, vznik nových zatížení zde není řešen.

První varianta je obdobná jako stávající stroj, má však větší rozměry a je vybavena otočným pracovním stolem a jednoosou frézovací hlavou. Druhá varianta je postavena jako tzv. „dolní gantry“, kdy se pohybují sloupy s příčником. Pro porovnání obou variant byla stanovena kritéria hmotnost pohyblivých částí stroje, dynamická stabilita, zachování původních částí stroje a celková hmotnost stroje. Hmotnosti jsou odhadovány dle 3D modelů odlitků. Dynamická stabilita je posouzena dle modální analýzy provedené pomocí výpočtu metodou konečných prvků. I když není známa přesná konstrukce odlitků, protože jsou modely vytvořeny za stejných podmínek, je možné jejich relativní porovnání. Z tohoto provedeného hodnocení byla vybrána druhá varianta, která předčila v daných kritériích variantu první.

Dále je proveden kontrolní výpočet desky, kterou je do rámu stroje připevněn pracovní stůl. Deska je kontrolována při excentrickém zatížení stolu. Pracovní stůl je uvažován jako dokonale tuhý a je zkoumáno naklonění roviny upínací plochy při zatížení. Výsledky analýzy jsou porovnány s normou DIN 7620 a deformace vznikající při zatížení nepřesahují dovolené limity.

V práci je navržena nová koncepce stroje, která šetří výrobci náklady, zároveň může ale zákazník využít větší výkony a může obrábět větší obrobky. Při návrhu je použito moderních softwarových nástrojů Siemens NX, Solid Edge, Mathcad. Práce přináší originální řešení stroje s průměrem stolu 1200 mm a poukazuje na trend v konstrukci takových strojů.

## Použitá literatura

1. Budujeme Kovosvit 1939-1940. *Novinky ze světa obráběcích strojů*. 2012, roč. září. 16.
2. LAŠOVÁ, V. *KKS/ZSVS Základy stavby obráběcích strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012, 154 s. ISBN 978-80-261-0126-0.
3. LUDAČKA, Z. Inovace pětiosého programu českého výrobce. In: [online]. © 2012 [cit. 2012-12-4]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com>
4. KOVOSVIT MAS. Katalog MCV Line 2012. In: [online]. [cit. 2012-12-4]. Dostupné z: [www.kovosvit.cz](http://www.kovosvit.cz)
5. DMG. Katalog Five Axis Universal Machining Centre DMU eVo. In: [online]. [cit. 2012-12-5]. Dostupné z: [www.dmgmoriseiky.com](http://www.dmgmoriseiky.com)
6. KOVOSVIT MAS. Katalog MCU 630 2010. In: [online]. [cit. 2012-12-4]. Dostupné z: [www.kovosvit.cz](http://www.kovosvit.cz)
7. ELSEVIER SCIENCE LTD. International Journal of Machine Tools and Manufacture. In: [online]. © 2003 [cit. 2012-12-8]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503000531>
8. DMG. 5 axis millin/turning machining centeres. In: [online]. [cit. 2012-12-5]. Dostupné z: [www.dmgmoriseiki.com](http://www.dmgmoriseiki.com)
9. HUDEC, Z. *Přednášky a cvičení předmětu Konstrukce obráběcích strojů, zkratka předmětu KKS/KOS a KKS/KVS*. Plzeň: 2012
10. HOSNEDL, S. a J. KRÁTKÝ. *Průručka strojního inženýra: obecné strojní části. 1, Spoje, otočná uložení, hřídelové spojky, akumulátory mechanické energie*. Praha: Computer Press, 1999

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 Portálový rám MCU 630 [3] .....	9
Obr. 2.2 C rám strojů řady MCV [4] .....	9
Obr. 2.3 Možnosti naklopení pracovního stolu (-30°, 120°) [6] .....	10
Obr. 2.4 Stůl pro paletový systém [6] .....	10
Obr. 2.5 Čtvercový stůl [6] .....	10
Obr. 2.6 Obráběcí centrum MCV 1000 5AX [3] .....	11
Obr. 2.7 DMU eVo 100 [5] .....	12
Obr. 2.8 Rám stroje DMU 100 P duoBlock® [8] .....	13
Obr. 2.9 Pohled shora DMU 100P duoBlock® [8] .....	17
Obr. 2.10 Pohled shora MCU 630 [6] .....	17
Obr. 2.11 Schéma posunutí těžiště .....	18

Obr. 2.12 Vřeteník stroje MCU 630 [6] .....	19
Obr. 2.13 Znázornění lineárních pojezdů DMU 100P duoBlock <sup>®</sup> [8] .....	20
Obr. 3.1 Původní vřeteník – nasazená frézovací hlava .....	23
Obr. 3.2 Zobrazení úhlů na vřetení .....	24
Obr. 3.3 Nárůst velikosti pracovního prostoru vlivem vyklonění hlavy .....	24
Obr. 3.4 Krajní poloha frézovací hlavy – pohled shora .....	25
Obr. 3.5 BW fixátor v podélném řezu .....	25
Obr. 3.6 Deska pro uložení stolu .....	26
Obr. 3.7 Vřetení frézovací hlavy Obr. 3.8 Pohled ve směru osy otáčení B .....	27
Obr. 3.9 Ukotvení původního pracovního stolu v rámu stroje [6] .....	28
Obr. 3.10 Zobrazení lože původního stroje .....	29
Obr. 3.11 Síly působící na frézovací hlavu při obrábění .....	30
Obr. 3.12 Návrh rozšíření lože nové koncepce .....	31
Obr. 3.13 Původní a nový stojan .....	32
Obr. 3.14 Rozšíření původního příčnicku .....	33
Obr. 3.15 Saně .....	33
Obr. 3.17 Smykadlo s původním vřetenem .....	34
Obr. 3.17 Smykadlo s frézovací hlavou .....	34
Obr. 3.18 Varianta I .....	34
Obr. 3.19 Lože varianty II .....	35
Obr. 3.20 Varianta II stojan .....	36
Obr. 3.21 Rozšíření příčnicku varianta II .....	37
Obr. 3.22 Původní a nové smykadlo, saně .....	37
Obr. 3.23 Varianta II .....	38
Obr. 3.24 Výpočtový model původního stroje .....	40
Obr. 3.25 Výpočtové modely varianty I (vlevo) a varianty II (vpravo) .....	41
Obr. 3.26 Vlevo tvar A 49 Hz, vpravo tvar B 66 Hz .....	42
Obr. 3.27 Vlevo tvar A 38 Hz, vpravo tvar B 23 Hz .....	42
Obr. 3.28 Vlevo tvar A 41Hz, vpravo Tvar B 31 Hz .....	42
Obr. 4.1 Maximální excentricita při zatížení stolu [9] .....	47
Obr. 4.2 Znázornění stavů zatížení na upínací desce .....	47
Obr. 4.3 Souřadnice sil a míst upevnění stolu .....	48
Obr. 4.4 Výpočtový model desky .....	50
Obr. 4.5 Deformace první stav zatížení .....	51
Obr. 4.6 Naklonění roviny $\sigma_1$ .....	51

Obr. 4.7 Deformace druhý stav zatížení.....	52
Obr. 4.8 Naklonění roviny $\sigma_2$ .....	53

## Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Srovnání strojů MAS a DMG .....	14
Tabulka 2-2 Srovnání se zadáním .....	15
Tabulka 2-3 Nestandardní výkonové parametry strojů .....	21
Tabulka 3-1 Parametry nové koncepce stroje .....	22
Tabulka 3-2 Váhy vlastností podložek a BW fixátoru .....	29
Tabulka 3-3 Pohyblivé hmotnosti varianta I .....	39
Tabulka 3-4 Pohyblivé hmotnosti varianta II.....	39
Tabulka 3-5 Pohyblivé hmotnosti varianta MCU 630 .....	39
Tabulka 3-6 Hodnoty vlastních frekvencí .....	41
Tabulka 3-7 Celková hmotnost varianta I .....	44
Tabulka 3-8 Celková hmotnost varianta II.....	44
Tabulka 3-9 Celková hmotnost varianta MCU 630 .....	44
Tabulka 3-10 Váhy kritérií.....	45
Tabulka 3-11 Bodovací stupnice.....	45
Tabulka 3-12 Hodnoty kritérií.....	46
Tabulka 3-13 Vyhodnocení variant.....	46
Tabulka 4-1 Souřadnice .....	49
Tabulka 4-2 Hodnoty posunutí z stav 1 .....	52
Tabulka 4-3 Hodnoty posunutí z stav 2 .....	53
Tabulka 5-1 Ceny nakupovaných montážních skupin .....	56
Tabulka 5-2 Paket Heidenhain (některé komponenty).....	56
Tabulka 5-3 Představitelé vyráběných montážních skupin (odlitky).....	56
Tabulka 5-4 Celková cena montážních skupin .....	57

## Seznam příloh

1. Schéma I – stroj s kolébkovým stolem
2. Schéma II – stroj s otočnou frézovací hlavou
3. Sestava varianta I – DP – 01
4. Sestava varianta II – DP – 02
5. Výkres klínu BW fixátoru – DP – 03 – 01