

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

HYBRIDNÍ CNC OBRÁBĚCÍ CENTRUM PRO ROTAČNÍ OBROBKY

HYBRID CNC MACHINING CENTER FOR ROTARY WORKPIECES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Jiříček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA, FEng.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Lukáš Jiříček**
Studijní program: Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA, FEng.**
Akademický rok: 2024/25

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

Hybridní CNC obráběcí centrum pro rotační obrobky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hybridní CNC obráběcí stroje jsou výrobní prostředky, které kombinují jak subtraktivní, tak aditivní způsob výroby. V současnosti jsou výrobci strojů hojně používány pouze dva aditivní způsoby výroby v tomto typu strojů, a sice elektrické navařování pomocí drátu a nanášení prášku laserem. Hybridní stroje jsou konstruovány jako frézovací, tak i soustružnická CNC obráběcí centra.

Cíle diplomové práce:

Současný stav řešené problematiky a její rozbor.
Systémový rozbor řešené problematiky.
Návrh variant hybridního stroje a výběr optimální varianty řešení.
Technické výpočty optimální varianty a další potřebné výpočty.
Komentář přiložené technické dokumentace.
Technicko – ekonomické zhodnocení.
Doporučení pro další rozvoj.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, s.r.o., 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

MAREK, J. et al. Stavba a provoz CNC obráběcích strojů [online]. 1. vyd. Brno: Ústav výrobních strojů systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 23. 3. 2023, updated, průběžně aktualizováno [cit. 07.09.2023]. Učebnice Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 1 svazek. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz/StavbaAProvoz/ev-1>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hybridního CNC obráběcího centra určeného pro výrobu rotačních obrobků. Cílem je navrhnout výrobní stroj, který integruje technologii třískového obrábění rotačních součástí s aditivním nanášením kovového materiálu. V úvodní části byla provedena rešerše v oblasti konvenčních i hybridních obráběcích strojů a aditivních technologií. Následně byl zpracován systémový rozbor problematiky a navrženy tři varianty obráběcího centra, které byly porovnány pomocí multikriteriální analýzy. Na základě výsledků této analýzy byla vybrána optimální varianta, u které byl proveden konstrukční návrh rotační soustavy doplněný o potřebné výpočty. Dále byl proveden základní návrh pohonů lineárních os včetně kuličkových šroubů a matic. Zbylé hlavní části obráběcího centra byly zvoleny a navrženy obecně tak, aby splňovaly základní požadavky hybridních obráběcích strojů. K zobrazení konstrukce rotační soustavy stroje byl vypracován výkres sestavy a výrobní výkresy vyráběných součástí. V závěru práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení hybridního CNC obráběcího centra a bylo zpracováno doporučení pro další rozvoj.

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the design of a hybrid CNC machining center intended for the production of rotational workpieces. The goal is to design a manufacturing machine that integrates subtractive machining of rotational components with the additive deposition of metallic material. The introductory part provides a literature review of conventional and hybrid machining centers as well as additive manufacturing technologies. A system analysis of the problem is conducted, followed by the development of three design variants of the machining center, which are compared using multi-criteria analysis. Based on the results of this analysis, the optimal variant is selected and a structural design of the rotary system is carried out, including the necessary calculations. The basic design of the linear axis drives, including ball screws and nuts, is also presented. The remaining main components of the machining center are selected and designed in general terms to meet the fundamental requirements of hybrid machining centers. An assembly drawing of the rotary system and production drawings of manufactured parts are included. The thesis concludes with a technical and economic evaluation of the hybrid CNC machining center and provides recommendations for further development.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hybridní CNC obráběcí centrum, Rotační soustava, Vřeteno, Lineární pohybové osy, Aditivní výroba

KEYWORDS

Hybrid CNC machining center, Rotary system, Spindle, Linear motion axes, Additive manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIRÍČEK, Lukáš. *Hybridní CNC obráběcí centrum pro rotační obrobky*. Online, diplomová práce. Jiří MAREK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166238>. [cit. 2025-05-10].

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval vedoucímu práce panu prof. Dr. Ing. Jiřímu Markovi, Ph.D., DBA, FEng. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Jiřího Marka, Ph.D., DBA, FEng. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23.05.2025

.....

Jiríček Lukáš

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	19
3.1	Obráběcí část stroje.....	20
3.1.1	Produkční soustruhy	21
3.1.2	Svislé soustruhy	22
3.2	Nekonvenční část stroje	23
3.2.1	Laser	23
3.2.2	Plazma	24
3.2.3	Svazek elektronů.....	25
3.2.4	Elektrický oblouk	26
3.2.5	HERMLE MPA (metal powder application).....	27
3.2.6	Aditivní technologie	28
3.3	Souhrn výrobců hybridních CNC obráběcích center	29
3.4	Shrnutí současného stavu poznání	31
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	33
4.1	Zadaná problematika.....	33
4.2	Cíl práce	33
4.3	Základní vlastnosti navrhovaného stroje	34
4.4	Konstrukčně-technologické vazby stroje.....	35
4.5	Vnitřní a vnější interakce stroje	36
4.6	Rozbor stavby stroje	37
4.7	Shrnutí systémového rozboru	38
5	NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY ŘEŠENÍ	39
5.1	Volba aditivní technologie.....	39
5.2	Varianta A.....	39
5.3	Varianta B	40
5.4	Varianta C	42
5.5	Multikriteriální analýza variant	43
5.5.1	Volba kritérií.....	43
5.5.2	Určení váhy kritérií.....	43
5.5.3	Hodnocení variant.....	44
6	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ OPTIMÁLNÍ VARIANTY	47
6.1	Konstrukční řešení rotační soustavy (vřetene).....	47
6.1.1	Řezné podmínky	47
6.1.2	Uložení vřetene.....	48
6.1.3	Upínání obrobku	49
6.1.4	Volba pohonu rotační soustavy	50
6.1.5	Kontrola dynamiky motoru	53
6.1.6	Kontrola ložisek.....	54
6.1.7	Odměrování polohy	58
6.2	Stavba rotační jednotky	59
6.3	Nosná soustava	60
6.3.1	Rám.....	60
6.3.2	Konzola.....	61

6.3.3	Příčnick	61
6.3.4	Support	62
6.4	Lineární posuvové soustavy	62
6.4.1	Lineární posuvová soustava suportu	63
6.4.2	Lineární posuvová soustava příčnicku	64
6.4.3	Lineární posuvová soustava konzoly	65
6.5	Řízení pohybů stroje	67
6.6	Aditivní jednotka	68
6.7	Obráběcí jednotka	68
6.8	Krytování	69
6.8.1	Vnitřní krytování pevné	69
6.8.2	Vnitřní krytování pohyblivé	70
6.8.3	Vnější krytování	70
6.9	Odvod třísek	71
6.10	Automatická výměna nástrojů	71
6.11	Automatická výměna obrobků	72
6.12	Přídavná zařízení	73
6.13	Celková sestava stroje	74
6.14	Technická dokumentace	74
7	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	75
8	DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ ROZVOJ	79
9	ZÁVĚR	81
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	83
11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	87
11.1	Seznam zkratk a symbolů	87
11.2	Seznam tabulek	92
11.3	Seznam obrázků	92
12	SEZNAM PŘÍLOH	95

1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je navrhnout inovativní řešení hybridního CNC obráběcího centra určeného pro výrobu rotačních obrobků. Navržené zařízení má kombinovat konvenční třískové obrábění s technologií aditivního nanášení kovových materiálů. Integrace těchto dvou odlišných výrobních metod do jednoho pracovního prostoru přináší výrazné zvýšení flexibility výroby, zkrácení jak výrobních, tak nevýrobních časů, a zároveň umožňuje efektivní produkci geometricky složitých součástí.

Hybridní CNC stroje nacházejí uplatnění především v automobilovém, leteckém a lékařském průmyslu, ale také v oblasti obranných a kosmických technologií. Vzhledem k tomu, že současná nabídka hybridních obráběcích strojů je zaměřena převážně na frézovací nebo multifunkční centra, představuje vývoj soustružnického hybridního centra potenciálně přínosný směr s možným praktickým uplatněním.

Úvodní část práce se věnuje přehledu současného stavu poznání. Jsou zde rozebrány výrobní stroje pro rotační obrobky a popsány principy a vlastnosti vhodných aditivních technologií. Tato rešeršní část je doplněna o přehled dostupných hybridních CNC obráběcích center. Následuje systémový rozbor problematiky, který slouží jako východisko pro návrh tří variant technického řešení. Na základě multikriteriální analýzy je vybrána optimální varianta, která je dále konstrukčně rozpracována. Návrh je doplněn výkresovou dokumentací a základními výpočty vybraných uzlů. V závěru práce je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení navrženého stroje a formulována doporučení pro další rozvoj řešené problematiky.

2 MOTIVACE

Rostoucí význam aditivních technologií ve strojírenské výrobě a potřeba jejich efektivního propojení s konvenčními metodami obrábění patří mezi hlavní důvody pro rozvoj hybridních CNC obráběcích center. Tyto stroje představují moderní směr vývoje obráběcích strojů, který otevírá nové možnosti při návrhu a výrobě složitých součástí. V současnosti jsou hybridní obráběcí centra dostupná převážně jako frézovací nebo multifunkční stroje, zatímco řešení specializovaná pro výrobu rotačních obrobků jsou méně rozšířená. Motivací této práce je navrhnout inovativní řešení, které by reagovalo na potřebu efektivní výroby rotačních součástí a zároveň odpovídalo současným trendům v průmyslové praxi, jako je zkracování výrobních časů, snižování nákladů, materiálového plýtvání, a zvyšování flexibility výroby.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Hybridní obráběcí centrum je výrobní stroj, který sdružuje více odlišných výrobních technologií do jednoho celku. V současné době se převážně jedná o kombinaci třískového obrábění (subtraktivní technologie) a aditivní technologie. Je ale také možné kombinovat třískové obrábění s jinými technologiemi založenými na fyzikálním principu, jako je například laser, plazma nebo paprsek elektronů. Hybridní stroje kombinující subtraktivní a aditivní technologie tedy umožňují jak odebrání materiálu, tak i jeho nanášení na součást. [1][3]

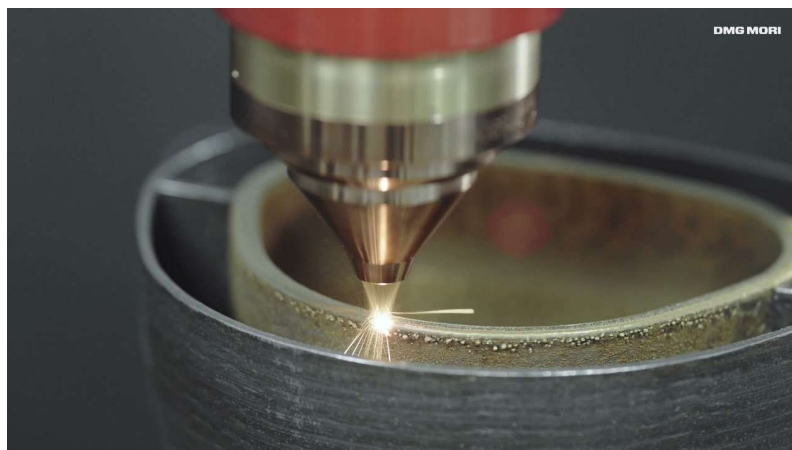


Obr. 1) Integrace aditivní výrobní technologie a víceúčelového obrábění [4]

Důvodem pro sdružování takto odlišných operací v jednom stroji je snaha zkrátit nevýrobní časy, a tím i celkový čas potřebný pro vytvoření výrobku. Kombinace těchto technologií umožňuje vyrábět na jednom stroji velmi složité součásti na jedno upnutí. Aditivní část stroje umožňuje opravit vyráběnou součást v případě chybného obrábění, a tím redukovat počet zmetků. Další výhodou je možnost nanášení materiálu a do jisté míry i vytváření polotovaru přímo v pracovním prostoru stroje. To má za následek větší úsporu materiálu a ekonomičtější výrobu. [1][2]

Hlavní nevýhodou hybridních obráběcích center je jejich vysoká pořizovací cena. Kombinace více technologií může mít za následek složitější optimalizaci výrobního procesu a komplikovanější údržbu a servis stroje. V porovnání s klasickým obráběcím centrem budou také kladeny vyšší nároky na obsluhu stroje, vytváření modelů a programů pro výrobu. [1][2]

Díky použití aditivní technologie umožňuje hybridní obráběcí centrum vyrábět tvarově složité součásti, součásti s vnitřními dutinami, žebrováním nebo s jinou výplní. Konvenční obráběcí část stroje poté zajistí, aby měl výrobek požadované rozměry a kvalitu povrchu. Hlavní uplatnění nacházejí tyto stroje v automobilovém, leteckém a lékařském průmyslu, ale také ve vojenských a vesmírných aplikacích. Typickými součástmi vyráběnými pomocí hybridních obráběcích center jsou například lopatková kola, složité formy, implantáty pro lékařský průmysl atd. Další uplatnění nacházejí tyto stroje při opravách poškozených nebo vadných součástí. [1][2]



Obr. 2) Aditivní výroba [5]

3.1 Obráběcí část stroje

CNC obráběcí centra pro výrobu rotačních součástí nebo také soustružnická CNC centra se vyznačují tím, že hlavní pohyb stroje je rotační a je konán obrobkem. Vedlejší pohyby, tedy posuv a přísuv, poté koná nástroj, který vytváří povrch obrobku. Tyto stroje lze rozdělit dle polohy vřetene na svislé a vodorovné, dále dle počtu řízených os na tříosé a víceosé, a dle počtu vřeten na jednovřetenové a vícevřetenové. [1]

Aby bylo možné tyto stroje považovat za CNC obráběcí centra, musí být schopny pracovat v automatickém cyklu. Musí umožňovat více technologických operací obrábění, kde soustružení je hlavní operací. Dále musí být vybaveny automatickou výměnou nástrojů a automatickou výměnou obrobků. [1]

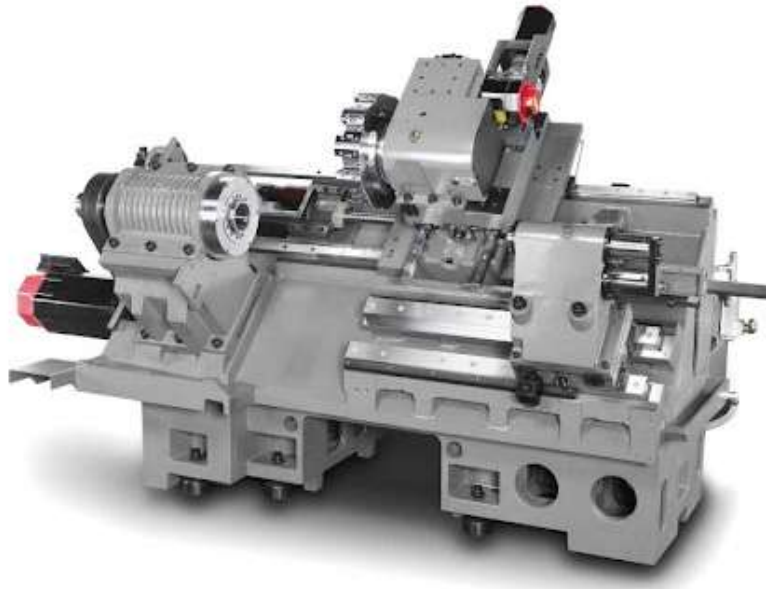


Obr. 3) Soustružnicko frézovací centrum [6]

Běžnými typy soustružnických strojů používaných v praxi jsou produkční soustruhy, svislé soustruhy, vícevřetenové automaty a speciální soustruhy. Pro tuto práci jsou vhodné produkční a svislé soustruhy. [1]

3.1.1 Produkční soustruhy

Tento typ soustruhů má vodorovnou osu vřetene s jedním nebo dvěma vřeteny. Na těchto obráběcích strojích se vyrábějí běžné rotační díly v malých a středních sériích. Hlavními částmi produkčních soustruhů jsou nosná soustava, lineární vedení, vřeteno, nástrojová jednotka a koník s lunetami. Dle požadavků zákazníka mohou být tyto stroje vybaveny opcemi. [1]



Obr. 4) CNC soustruh s lineárním vedením [7]

Nosná soustava soustruhu se nejčastěji odlévá z šedé litiny, svařuje z oceli, nebo vyrábí z kompozitních materiálů. Její funkcí je zachycení staticky působících sil, sil vznikajících při obrábění a tlumení kmitání. Rám tedy musí být dostatečně tuhý. Dále musí být teplotně stálý, musí zajišťovat snadnou přepravu stroje a jeho montáž na základ. Při výrobě nosné soustavy by měl být materiál využit efektivně tak, aby měla nízkou hmotnost při zachování požadované tuhosti a dalších mechanických vlastností. Hlavní částí nosné soustavy u soustruhů je lože, na kterém jsou připevněny ostatní části. Může být buď šikmé, nebo ortogonální. Lože musí být dostatečně tuhé a musí umožňovat dobrý odvod třísek. Další částí je vřeteník. Ten slouží pro uložení hlavního vřetene. Musí být tuhý a zachycovat síly při obrábění a od hmotnosti samotného vřetene a obrobku. Suport je pohyblivý člen, na kterém je umístěna nástrojová jednotka. Zachytává a přenáší síly vznikající při řezném procesu. [1]

Vodící plochy a pohonné členy (pastorek a hřeben, šroub) lineárního vedení jsou montovány na části nosné soustavy. Slouží k pohybu suportů, koníku a lunet. Musí být zajištěno vhodné krytování lineárního vedení tak, aby nedošlo k jejímu opotřebení a poškození vlivem třísek. [1]

Vřeteno zajišťuje rotaci obrobku a přenos požadovaného kroutícího momentu. Do vřetene je obrobek upínán prostřednictvím sklíčidla, hrotu, nebo upínací desky. Může mít buď přímý náhon (elektrovřeteno), nebo může být poháněno nepřímo přes řemenový převod nebo převodovku. Hlavními vlastnostmi vřetene by měly být tuhost, spolehlivost, přesnost a malé ztráty při rotaci. Pro obrábění delších součástí může být vřeteno průchozí. C-osa je realizována vestavěným motorem v případě elektrovřetene, nebo zvláštním převodem přes šneková či čelní ozubená kola. [1]

Nástroje nesené v držácích se upínají do revolverové hlavy. Upínání je vyřešeno buď z čela, nebo kolmo na osu hlavy. Nástrojová soustava je normalizována. Náhon rotačních nástrojů je realizován pomocí náhonové tyče, převodů a spojky, nebo vestavěným torzním motorem. [1]

Koník se převážně používá při upínání obrobku mezi hroty. Musí být tuhý v radiálním směru a dovolovat dilatace ve směru axiálním. Může být pevný nebo posuvný. Lunety slouží k podepření delších obrobků při soustružení. Mají kluzné nebo valivé stykové plochy. Mohou být pevné nebo posuvné. [1]

3.1.2 Svislé soustruhy

Tento typ soustružnických strojů má svislou osu rotace obrobku. Nejčastěji se používá pro obrábění kratších součástí větších průměrů. Hlavními částmi jsou nosná soustava, rotační upínací deska a smykadlo. [1]



Obr. 5) Svislý soustruh ČKD SKDY [8]

Nosná soustava se skládá z jednoho nebo dvou stojanů, příčnicku, lože, příčnickového a stojanového suportu, a horní příčky. Dle počtu stojanů je možné svislé soustruhy rozdělit na jedno a dvoustojanové. Příčnickový suport se pohybuje po příčnicku a slouží k vedení smykadla. Horní příčka spojuje dva stojany v uzavřenou konstrukci. Nosná soustava se vyrábí z litiny, oceli, nebo kompozitních materiálů. Podstatnou vlastností nosné soustavy je opět tuhost. [1]

Rotační upínací deska je uložena v loži soustruhu. Musí být vedena axiálně i radiálně v obou směrech. Zachytává síly vzniklé při obrábění a síly od hmotnosti samotného obrobku. Upínací deska může být uložena kluzně, valivě, kombinací kluzného a valivého uložení nebo hydrostaticky. Náhon rotační desky je vyřešen přes servomotor a řemenový převod pohánějící pastorek a ozubený věnec. Druhou možností je využití dvou motorů a systému master slave. Dále je pro pohon možné využít segmentový torzní motor. [1]

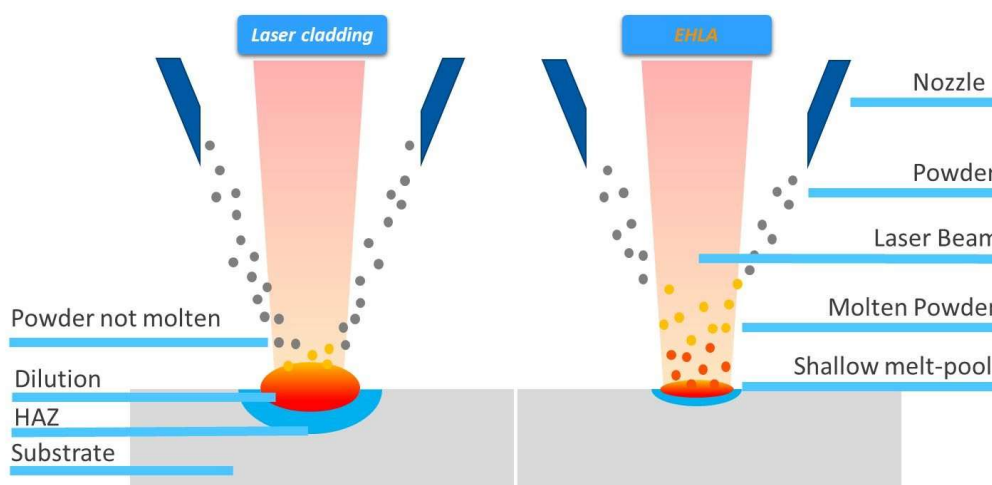
Smykadlo vedeno v příčnickovém suportu slouží k nesení nástrojové jednotky. Jeho pohyb je realizován kuličkovým šroubem. Nástroje se upínají na čelo smykadla. Pro rotační nástroje je smykadlo opatřeno náhonem. Výměna nástrojů ze zásobníku probíhá pomocí manipulátoru, nebo pick-up metodou. [1]

3.2 Nekonenční část stroje

V následující části práce budou představeny některé z nekonvenčních výrobních technologií. Především se jedná o technologie, jejichž princip umožňuje aditivní nanášení materiálu, a které jsou vhodné pro použití u hybridních obráběcích strojů. V této práci nebudou detailně zmiňovány aditivní technologie založené na principu spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion), protože jsou nevhodné pro výrobu rotačních částí na hybridním obráběcím stroji.

3.2.1 Laser

Laser je optický zdroj koherentního elektromagnetického záření, který vzniká stimulovanou emisí částic. V aktivní látce je vyvolávána emise, záření zde zesiluje. Po dosažení dostatečné intenzity je záření uvolněno ve formě paprsku laseru. Aktivním prostředím je nejčastěji pevná látka (monokrystal), nebo plynné prostředí (např. CO₂). [9]



Obr. 6) Schéma nanášení materiálu laserem [11]

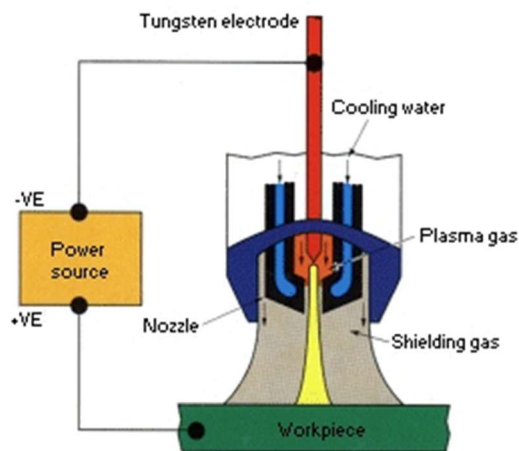
Velkou výhodou laseru je v porovnání s plazmou jeho úzký paprsek a tím i malá teplotně ovlivněná oblast při jeho použití. Laser se v průmyslu využívá především ke svařování kovů a řezání různých materiálů. Dále je možné jej využít k žihání a kalení, ale také k čištění povrchů, značení a gravírování. [10]

Významnou aplikací laseru je nanášení materiálu, někdy také označováno jako laser cladding. Při tomto procesu dochází k natavení přídavného a základního materiálu. Jejich následným ztuhnutím vzniká nanášená vrstva. Pomocí laseru lze nanášet různé druhy materiálů, jako například hliník, měď, nikl, titan a jejich slitiny, dále nerezovou i nástrojovou ocel a karbidy. Nanášená vrstva materiálu má minimální poréznost. Velikost vrstvy se běžně pohybuje v řádech desítek až stovek mikrometrů. Vnesené teplo při tomto procesu závisí na parametrech nanášení, ale ve srovnání s ostatními technologiemi je menší. Nanášení velkého množství

materiálu může mít za následek trhliny. V takovém případě je vhodné využít přehřevu základního materiálu a řízeného ochlazování nanesených vrstev. Výhodou technologie laser cladding je vysoká přesnost, a tím pádem menší požadavky na následné obrábění. Touto technologií lze vyrábět součásti složitějších tvarů s detailními prvky, jako jsou například chladicí kanálky, složité výplňové struktury atd. Dalším pozitivem je jednoduchá automatizace této technologie. Nevýhodou může být vyšší pořizovací cena. [11]

3.2.2 Plazma

Plazma vzniká při dodávání energie do plynu. Plyn ionizuje a vytváří tak paprsek s vysokou koncentrací energie. Ionizace plynu probíhá při jeho průchodu elektrickým obloukem. Paprsek plazmatu se využívá k dělení materiálu, svařování, ale také k čištění povrchů součástí, nanášení povlaků a k nanášení kovů. [12]



Obr. 7) Schéma svařování plazmou [30]

Nanášení kovů pomocí plazmatu, nebo také Plasma Metal Deposition (PMD), probíhá natavením přídavného materiálu (prášek, drát) a jeho propojením se základním materiálem, nebo s předešlou vrstvou návaru. Použitím plazmatu dochází k minimálnímu natavení základního materiálu. Tepelně ovlivněná oblast v okolí nanesené vrstvy je větší než v případě laseru, ale její velikost závisí na zvolených parametrech této technologie. Vnesené teplo především ovlivňuje rychlost posuvu trysky a výkon paprsku. Návar je hladký, bez výrazných vad a porézností a je metalurgicky propojen se základním materiálem. Technologie plazmového paprsku je vhodná pro automatizaci a robotizaci. Díky vysokým teplotám plazmatu je možné nanášet různé kovy jako jsou titan, hliník, ocel, slitiny niklu, mědi. PMD technologie se vyznačuje vysokou produktivitou. Množství naneseného materiálu dosahuje až 10 kg za hodinu. Výška nanesené vrstvy kovu se pohybuje v jednotkách milimetru, většinou v rozmezí 1 až 3 mm. Nevýhodou relativně velkých vrstev materiálu může být menší přesnost a přítomnost přesahů jednotlivých vrstev. To má za následek nutnost následného obrábění po této aditivní technologii. Touto technologií lze vyrábět součásti s jednodušší geometrií. [13][14]



Obr. 8) Aditivní výroba pomocí plazmatu [15]

Výrobce SBI má ve své nabídce stroj M3DP industrial line, který využívá paprsek plazmatu k aditivní výrobě součástí. Hlavními částmi jsou napájecí zdroj, zásobník přídavného materiálu, zdroj stlačeného plynu a ovládací panel. Stroj je plně zakrytý. Při práci s kovy citlivými na kyslík a vlhkost je možné stroj opatřit vzduchotěsnou konstrukcí, a vzduch uvnitř pracovního prostoru stroje nahradit inertním plynem. Plazmová hlava je opatřena hořákem, dvěma podavači drátu, kamerovým systémem a pyrometry pro měření teploty. Pohyb hlavy v pracovním prostoru stroje je zajištěn pomocí gantry systému. Dále je stroj opatřen stolem, který umožňuje manipulaci s vyráběnou komponentou. [15]



Obr. 9) Aditivní stroj M3DP [15]

3.2.3 Svazek elektronů

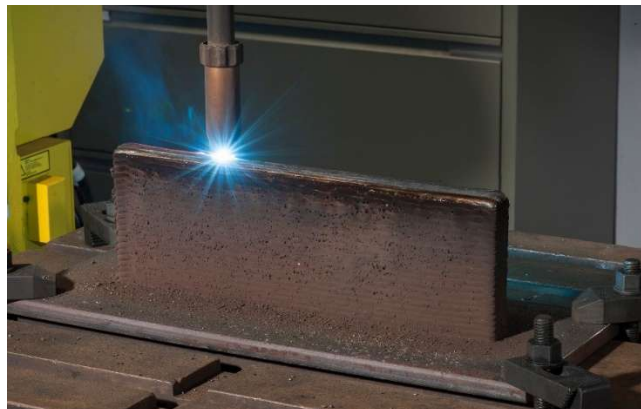
Principem této technologie je pohyb volných elektronů v úzkém, zpravidla kuželovitěm prostoru vysokou rychlostí. Tento svazek elektronů je orientován směrem ke zpracovávanému materiálu. Jednotlivé elektrony pronikají do povrchu materiálu, jejich kinetická energie se postupně mění na tepelnou a dochází k odpařování materiálu. [16]

Tato technologie se využívá především ke svařování a k nanášení tenkých vrstev kovu na součást (většinou pouze jedné vrstvy) pro zlepšení vlastností. Využití svazku elektronů pro aditivní výrobu je možné, ale prozatím ne běžné. Podstatnou nevýhodou je velmi vysoká pořizovací cena a také požadavek vakua při provozu těchto zařízení. [17]

3.2.4 Elektrický oblouk

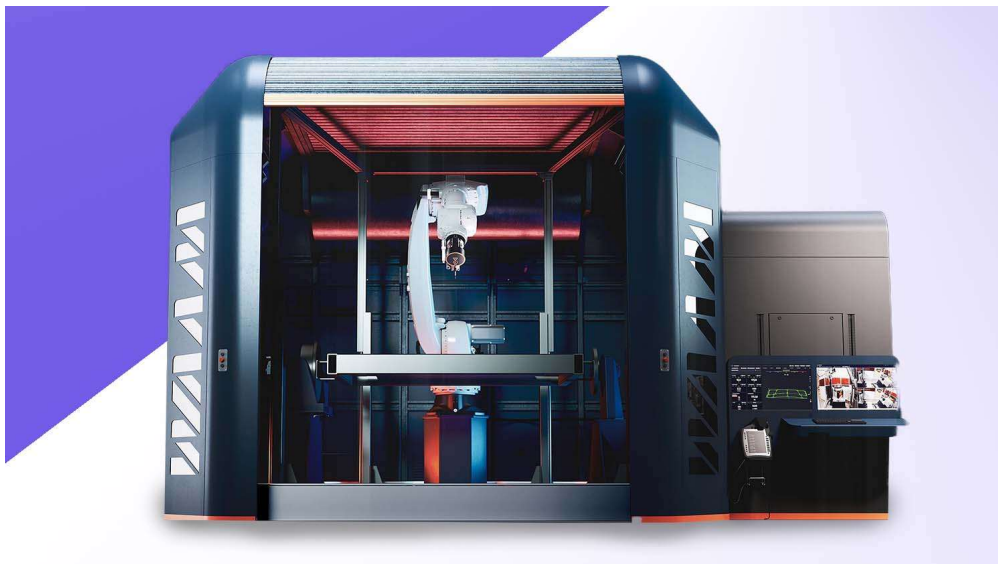
Technologie elektrického oblouku je v průmyslu využívána především jako prostředek pro svařování kovů. Princip spočívá v přeskočení elektrického oblouku mezi tavnou či netavnou elektrodou a vodivým základním materiálem. Elektrický oblouk taví jak přídavný, tak i základní materiál, a vytváří tak tavnou lázeň. Postupným tuhnutím tavné lázně dojde k vytvoření svaru, nebo případně návaru. [18]

Samotných technologií svařování elektrickým obloukem je několik. Pro automatizaci je nejvýznamnější technologie MIG/MAG. U této metody je tavná elektroda ve formě drátu a slouží jako přídavný materiál. Samotné svařování probíhá v ochranném plynu, který je buď inertní (argon) nebo aktivní (CO₂). Tuto technologii je také možno využít k nanášení vrstev kovu. Výhodou použití této technologie pro aditivní výrobu je její jednoduchost a nízká pořizovací cena. Hořák svářečky vyžaduje minimální reorientaci při nanášení kovu. Další výhodou je velké množství naneseného materiálu a vysoká produktivita. Velikost nanesené vrstvy je obvykle okolo 2 mm. Nevýhodou je relativně malá přesnost a velké přesahy vrstev. Po nanášení materiálu následuje obrábění funkčních i nefunkčních ploch. Tato technologie není vhodná pro výrobu složitě tvarovaných součástí. Míra vneseného tepla při navařování závisí na rychlosti posuvu hořáku a proudových parametrech svářečky. Samotné navařování je relativně hlučné a musí se počítat se zářením vytvářeným elektrickým obloukem. [19][20]



Obr. 10) Aditivní výroba pomocí elektrického oblouku [20]

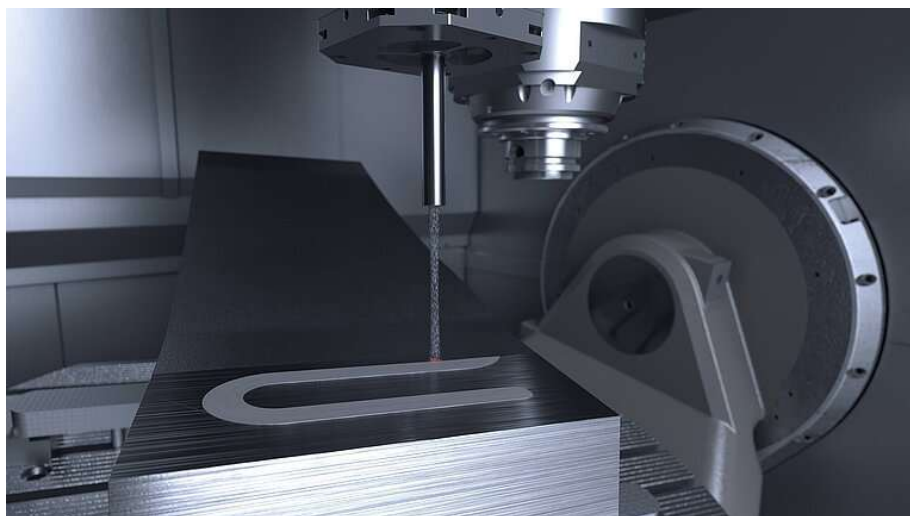
Jedním z výrobců strojů určených k aditivnímu nanášení kovu pomocí elektrického oblouku je společnost WAAM3D. Tato společnost vyvinula zařízení RoboWAAM a k němu i potřebný software. Součástí stroje je napájecí zdroj, řídicí jednotka a ovládací panel pro monitorování a ovládání všech funkcí. Dále podavač a zásobník drátu, u kterého může být drát vyměněn zvenku bez porušení ochranné atmosféry. Zařízení pro vytváření vhodné atmosféry v prostoru stroje zajišťuje odsávání škodlivých výparů, a v případě potřeby (při práci s reaktivními kovy) plnění pracovního prostoru ochrannou inertní atmosférou. Pracovní prostor stroje je neprůhledně zakrytován. Manipulačním zařízením je angulární robot, který je opatřen koncovým efektozem. Koncovým efektozem je svařovací hlava (hořák) s možností monitorování tavné lázně, měřením teploty, a vytváření lokální ochranné atmosféry. Vyráběná součást je umístěna na pracovním stole, který umožňuje její posuv a natáčení. [21]



Obr. 11) Robotické aditivní pracoviště RoboWAAM [21]

3.2.5 HERMLE MPA (metal powder application)

Tato technologie byla vyvinuta firmou Hermle. Jedná se o aditivní technologii vyrábějící komponenty vrstvu po vrstvě urychlováním kovového prášku v trysce. Kovový prášek je unášen proudem plynu do nanášecí jednotky. Zdrojem energie je přehřátá pára. Kombinace těchto dvou proudů v trysce zajišťuje přenos energie z páry na částice prášku a urychlení částic na nadzvukové rychlosti. Při dopadu částic na povrch základního materiálu se jejich kinetická energie mění na plastickou deformaci materiálu. V místě kontaktu dojde k propojení částic prášku s povrchem základního materiálu. Postupným dopadáváním částic se vytváří zhutněná vrstva materiálu. Nedochozí k tavení materiálu, ale pouze k jeho plastické deformaci. Teplotní namáhání je relativně malé. Touto technologií lze nanášet běžné dostupné kovové materiály ve formě prášku, jako jsou ocel, měď, bronz, hliník, titan, a jejich slitiny, ale také kombinace jednotlivých materiálů. [22]



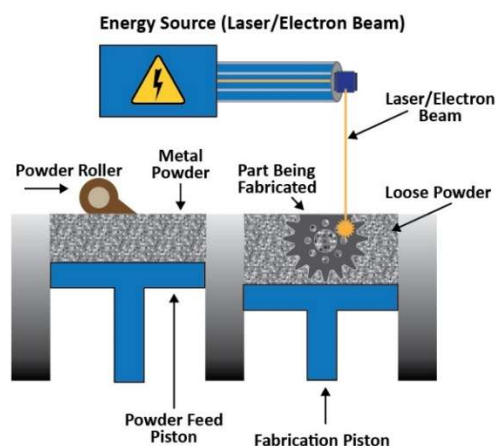
Obr. 12) HERMLE MPA technologie [22]

3.2.6 Aditivní technologie

V předchozích odstavcích byly popsány některé z možných fyzikálních principů nanášení materiálu. Výrobních procesů pro aditivní vytváření komponent existuje několik typů, které se liší především materiálem, který zpracovávají a principem jeho nanášení. Tato práce je primárně zaměřena na technologie, které využívají kovové materiály. V současné době se pro aditivní výrobu používají především dvě metody, a to spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion) a přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition).

Powder Bed Fusion je technologie při které dochází ke spékání částic materiálu (prášku) vrstvu po vrstvě. Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny posunutím pracovní desky o výšku jedné vrstvy a rozprostřením prášku. Nanášení jednotlivých vrstev probíhá pomocí násypky, čepele, nebo válce, popřípadě jejich kombinací. Jako zdroj tepla pro tavení prášku a spojování vrstev se používá laser (SLM), nebo paprsek elektronů (EBM). [23]

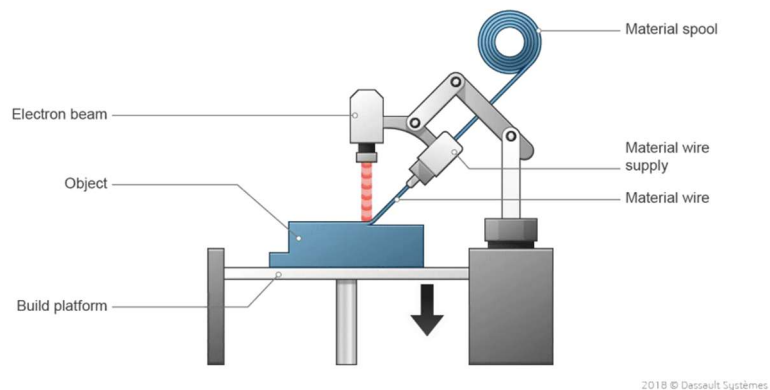
Hlavními částmi strojů používajících PBF technologii jsou zdroj energie, zdroj prášku a nanášecí prvek. Stroje mohou být dále doplněny o systém pro přesívání a navrácení nevyužitého prášku, dále o zařízení pro vytvoření a udržování ochranné atmosféry, a filtrační systémy.



Obr. 13) Schéma PBF technologie [24]

Directed Energy Deposition je technologický proces kde dochází k nanášení materiálu, jeho zahřívání a tavení. Jako zdroj tepla se používá laser, plasma, elektrický oblouk, nebo paprsek elektronů. Používaný materiál je ve formě prášku, nebo drátu. Zaměřením zdroje tepla a současným nanášením materiálu na jedno místo vzniká oblast tavné lázně. Postupným nanášením, tavením materiálu a jeho následným tuhnutím se vytvářejí jednotlivé vrstvy výrobku. Paprsek energie a přídavný materiál vystupují z nanášecí trysky. [25]

Stroj pro aditivní výrobu pomocí DED se primárně skládá ze zdroje energie, zdroje a dopravníku přídavného materiálu a nanášecí trysky. Většina zařízení využívající technologii DED má naváděnou trysku ve třech osách. Další pohyby obrobku zajišťuje otočný pracovní stůl. Důležitou součástí je opět filtrace vzduchu, sběr výparů a vytváření ochranné atmosféry. Pro jednodušší manipulaci s výrobky může být součástí stroje rukavicový box.



Obr. 14) Schéma DED technologie [29]

Při aditivní výrobě součásti z práškového materiálu můžeme rozlišit dva principy, a to tavení (melting) a spékání, nebo také slinování (sintering). V případě spékání dojde pouze k natavení jednotlivých částic materiálu a jejich propojení na molekulární úrovni. Tavení využívá výkonnější zdroj tepla, tím dojde k roztavení jednotlivých částic a vytvoření celistvé struktury. [26]

3.3 Souhrn výrobců hybridních CNC obráběcích center

Výrobce DMG MORI nabízí stroje řady Lasertec DED hybrid. Tyto stroje kombinují aditivní výrobu a frézovací nebo soustružnicko-frézovací operace. Vycházejí z frézovacích nebo soustružnických center v pětiosém provedení. Jsou vybaveny koaxiální tryskou, která umožňuje nanášení materiálu. Používaný materiál je ve formě prášku, a jako zdroj tepla je použit laser (aditivní metoda DED). Nanášecí tryska je součástí frézovací hlavy a je oddělitelná. Tyto stroje nacházejí uplatnění v 3D výrobě, povlakování a povrchových úpravách, opravách součástí a aplikacích bi-metalu. [6]



Obr. 15) Hybridní stroj Lasertec 3000 DED hybrid [6]

Výrobce Mazak má ve své nabídce stroje řady Integrex I-AM. Jedná se o pětiosá soustružnická obráběcí centra s vodorovnou osou vřetene. Součástí stroje je samostatná aditivní hlava portálového typu. Tryska aditivní hlavy vede materiál ve formě prášku a laserový paprsek jako zdroj tepla. Firma Mazak dále nabízí stroje řady Variaxis J-AM. Tyto stroje vycházejí z pětiosých frézovacích center. Umožňují aditivní výrobu pomocí laseru a prášku, nebo pomocí elektrického oblouku a drátu. [4]



Obr. 16) Hybridní stroj INTEGREGX i-300 AM [4]

Japonská firma Matsuura nabízí hybridní stroje řady LUMEX Avance. Tyto stroje kombinují aditivní technologii laserového spékání práškové vrstvy a frézování. Frézování je umožněno i v průběhu aditivního procesu mezi nanášením jednotlivých vrstev. Tím je možno dosáhnout obrobeneých vnitřních ploch výrobku. [27]



Obr. 17) Hybridní stroj LUMEX Avance-25 [27]

Výrobce strojů Hermle nabízí hybridní obráběcí centrum. Tento stroj vychází z pětiosého obráběcího centra HERMLE C 400, do kterého je integrována MPA jednotka. Nanášecí tryska je spojena s konstrukcí vertikálně umístěného vřetene. Součástí stroje je otočný a naklápěcí stůl. [22]

Tab 1) Přehled výrobců

Stroj	Typ třískového obrábění	Typ aditivní technologie		Velikost pracovního prostoru [mm]
		Zdroj energie	Přídavný materiál	
DMG MORI LASERTEC 3000 DED hybrid	Soustružení a frézování	DED		675 x 300 x 3062
		LASER	prášek	
DMG MORI LASERTEC 125 DED hybrid	Frézování	DED		1335 x 1250 x 900
		LASER	prášek	
MAZAK INTEGREGX i-300s AM	Soustružení a frézování	DED		-
		LASER	prášek	
MAZAK VARIAXIS j-600/5X AM	Frézování	DED		-
		LASER/ el. oblouk	prášek/drát	
MATSUURA LUMEX Avance-25	Frézování	PBF		260 x 260 x 100
		LASER	prášek	

3.4 Shrnutí současného stavu poznání

Hybridní obráběcí centra jsou v současné době relativně málo rozšířená, ale mají vysoký potenciál využití ve výrobě. Jejich aplikace ve výrobním procesu umožňuje odebrání a nanášení materiálu obrobku ve stejném pracovním prostoru. Hlavními výhodami hybridních obráběcích center jsou úspora materiálu a zkrácení výrobních a nevýrobních časů, při zachované přesnosti a opakovatelnosti obrábění. Využití nacházejí především při výrobě tvarově složitých výrobků a struktur, ale také při opravách součástí.

Hlavní části hybridních obráběcích center se výrazně neliší od běžných obráběcích center. Mezi hlavní konstrukční části obráběcích strojů patří nosná soustava, lineární posuvová soustava a rotační soustava. Aby se mohlo jednat o hybridní obráběcí stroj, musí být tyto části doplněny o aditivní soustavu. Hybridní obráběcí centrum poté musí splňovat možnost práce v automatickém cyklu, musí umožňovat více technologických operací obrábění a automatickou výměnu nástrojů a obrobků.

Nekonvenčních výrobních technologií využitelných v hybridních obráběcích centrech je více. Pro aditivní výrobu jsou podstatné především technologie laseru, plazmy, svazku elektronů a elektrického oblouku. Každá z těchto technologií má jiné výhody a nevýhody, a tím pádem i jiné využití ve výrobě. Aditivní soustava se obecně skládá ze zdroje energie, zásobníku

a podavače přídavného materiálu a nanášecí jednotky. Důležitou součástí strojů pracujících s aditivními technologiemi jsou zařízení pro vytváření ochranné atmosféry, filtrační systémy a krytování.

Přední výrobci obráběcích strojů mají ve své nabídce hybridní obráběcí centra v různých velikostech a provedeních. Nejčastěji jsou dostupné pětiosé stroje, které vycházejí buď z multifunkčních center s vodorovnou osou vřetene anebo z vertikálních frézovacích obráběcích center. Většina výrobců využívá aditivní technologii přímého nanášení materiálu (DED) ve formě prášku nebo drátu. Jako zdroj tepla pro nanášení materiálu je většinou využit laser nebo elektrický oblouk. Výjimkou jsou stroje využívající technologie PBF a HERMLE MPA. U hybridních obráběcích center s technologií přímého nanášení materiálu je nanášecí jednotka aditivní soustavy umístěna buď přímo na obráběcí jednotku (oddělitelně nebo napevno), nebo samostatně na zvláštní suport či smykadlo.

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Systémový přístup je jednou z podpůrných strategií při řešení koncepčně-strukturních problémů. Tento přístup napomáhá řešiteli k uvědomělému přístupu při návrhu technických objektů. Metoda uplatňuje poznatky vědního oboru *Engineering Data Science* (EDS). Princip EDS je založen na uspořádání teoretických a praktických poznatků do „mapy“, která pomáhá řešiteli určit směr řešení problému. Správně a podrobně uspořádané poznatky poskytují potřebnou oporu pro řešení koncepčně-strukturních problémů. Základem pro zpracování návrhu technického objektu je rozbor zadané problematiky a požadované cíle, kterých má být dosaženo. [30]

4.1 Zadaná problematika

Udržitelnost a flexibilita jsou důležitými aspekty moderních výrobních strojů. Jsou to právě hybridní obráběcí centra, která dovolují vysokou úroveň přizpůsobení výrobního procesu potřebám zákazníka. Toto odvětví výrobních strojů dále umožňuje lepší využití materiálu, a tím snížení odpadu a omezení plýtvání.

Většina dostupných hybridních obráběcích center je založena na multifunkčních obráběcích strojích. Přestože je dostupných aditivních technologií celá řada, výrobci se primárně zaměřují na implementaci laserové technologie pro přímé nanášení materiálu. To umožňuje aditivní výrobu složitě tvarovaných součástí s vysokou přesností. Každá z jednotlivých aditivních technologií má však jiné přednosti a nedostatky, a tím pádem i jiné ideální využití ve výrobním procesu.

4.2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je navrhnout hybridní obráběcí centrum pro výrobu rotačních obrobků. Navržené obráběcí centrum bude využívat jednu z dříve představených aditivních technologií k nanášení materiálu. Hybridní obráběcí centrum musí být navrženo s ohledem na výhody, nevýhody a ideální použití zvolené aditivní technologie. Velikost navrhovaného výrobního stroje je zvolena na základě zpracovaného přehledu současného stavu poznání. Velikost pracovního prostoru je zvolena pro maximální průměr obrobku 400 mm a výšku 400 mm. Maximální hmotnost obrobku je zvolena 300 kg.

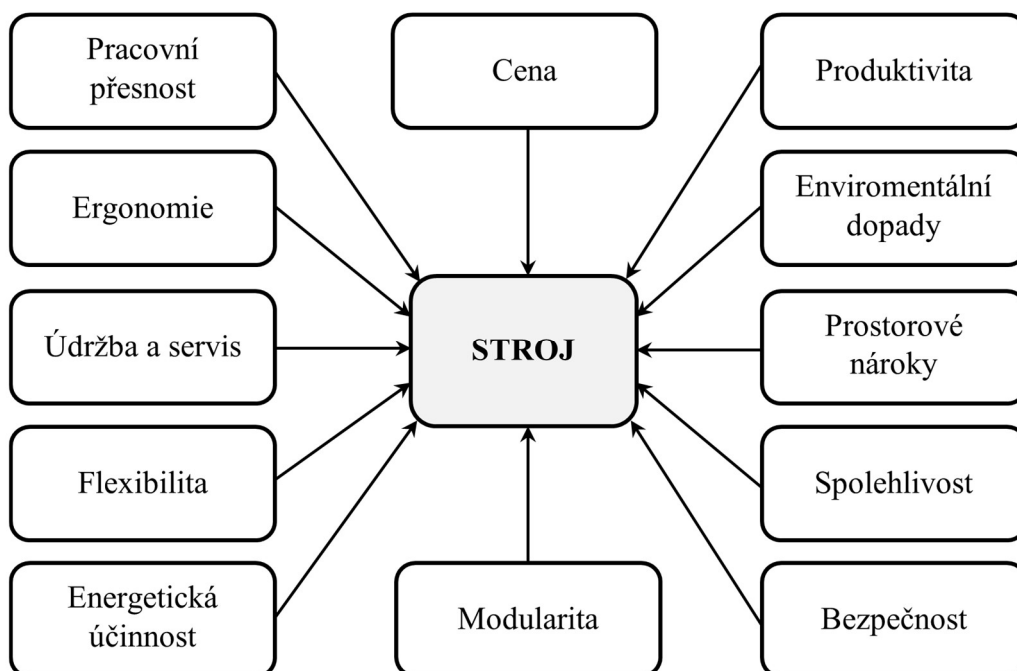
Podkladem pro řešení diplomové práce je zpracovaný přehled současného stavu poznání. Cílem je navrhnout více variant řešení hybridního obráběcího centra a pomocí multikriteriální analýzy zvolit vhodnou variantu. Dále je cílem provést technické a další potřebné výpočty optimální varianty, vytvořit technickou dokumentaci, která bude doplněna o komentář, zpracovat technickoekonomické zhodnocení, a popsat doporučení pro další rozvoj.

4.3 Základní vlastnosti navrhovaného stroje

Požadavky na základní vlastnosti navrhovaného stroje a jejich významnost se může lišit dle konkrétních potřeb zákazníka. Obecně lze stanovit následující vlastnosti, na které je nutné brát ohled před a v průběhu návrhu stroje.

Základní vlastnosti:

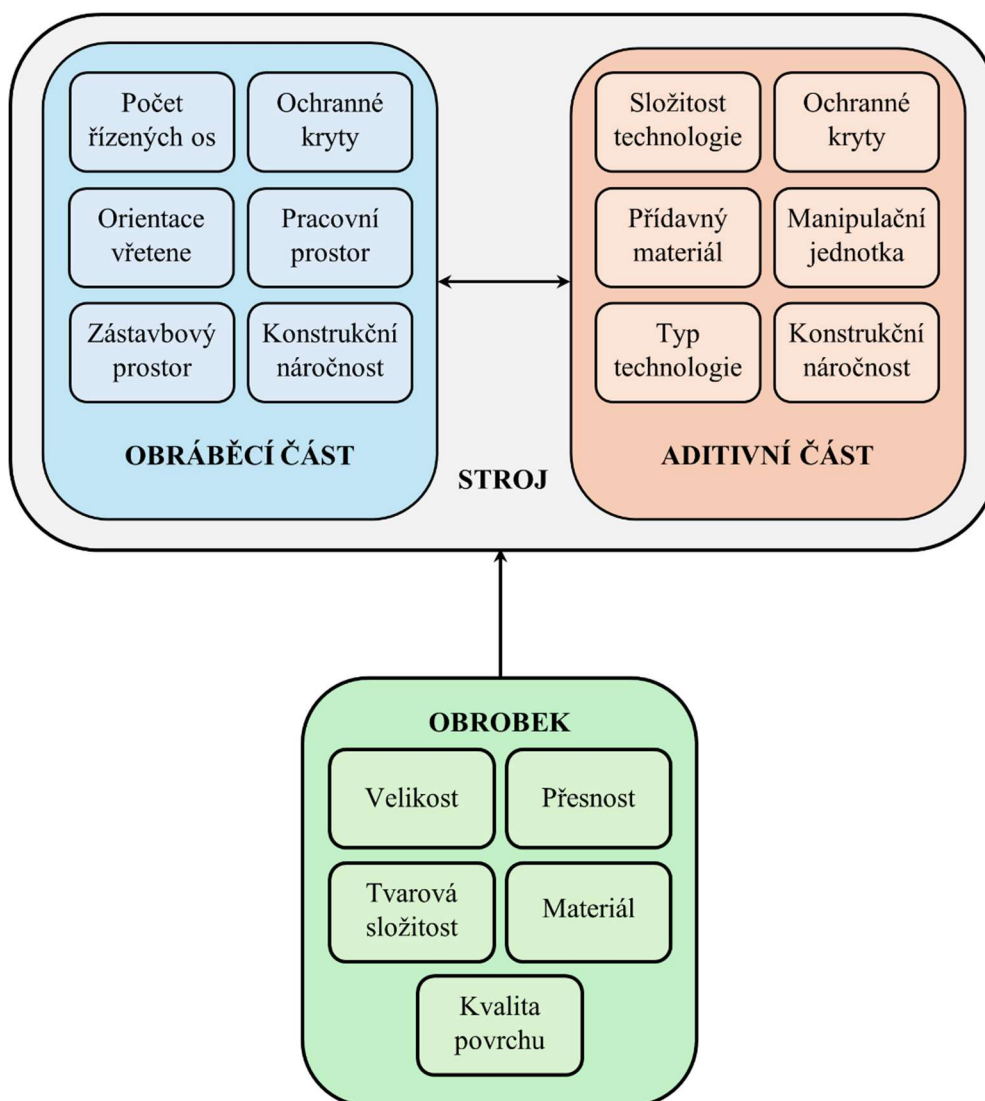
- Cena – počáteční investice a náklady na provoz
- Produktivita – počet vyrobených kusů v daném čase
- Environmentální dopady – dopady na životní prostředí
- Prostorové nároky – velikost prostoru potřebného pro stroj, jeho obsluhu, opravu a seřízení
- Spolehlivost – dlouhá životnost stroje, provoz bez závad
- Bezpečnost – splnění příslušných právních předpisů a norem
- Energetická účinnost – nízká spotřeba energie při provozu
- Flexibilita – schopnost přizpůsobit se změnám ve výrobním procesu
- Údržba a servis – dostupnost náhradních dílů a servisní podpory
- Ergonomie – nenáročná obsluha a řízení stroje
- Pracovní přesnost – přesnost stroje při provozních podmínkách
- Modularita – schopnost přizpůsobit nebo rozšířit stroj pomocí modulů či opcí



Obr. 18) Základní vlastnosti obráběcího stroje

4.4 Konstrukčně-technologické vazby stroje

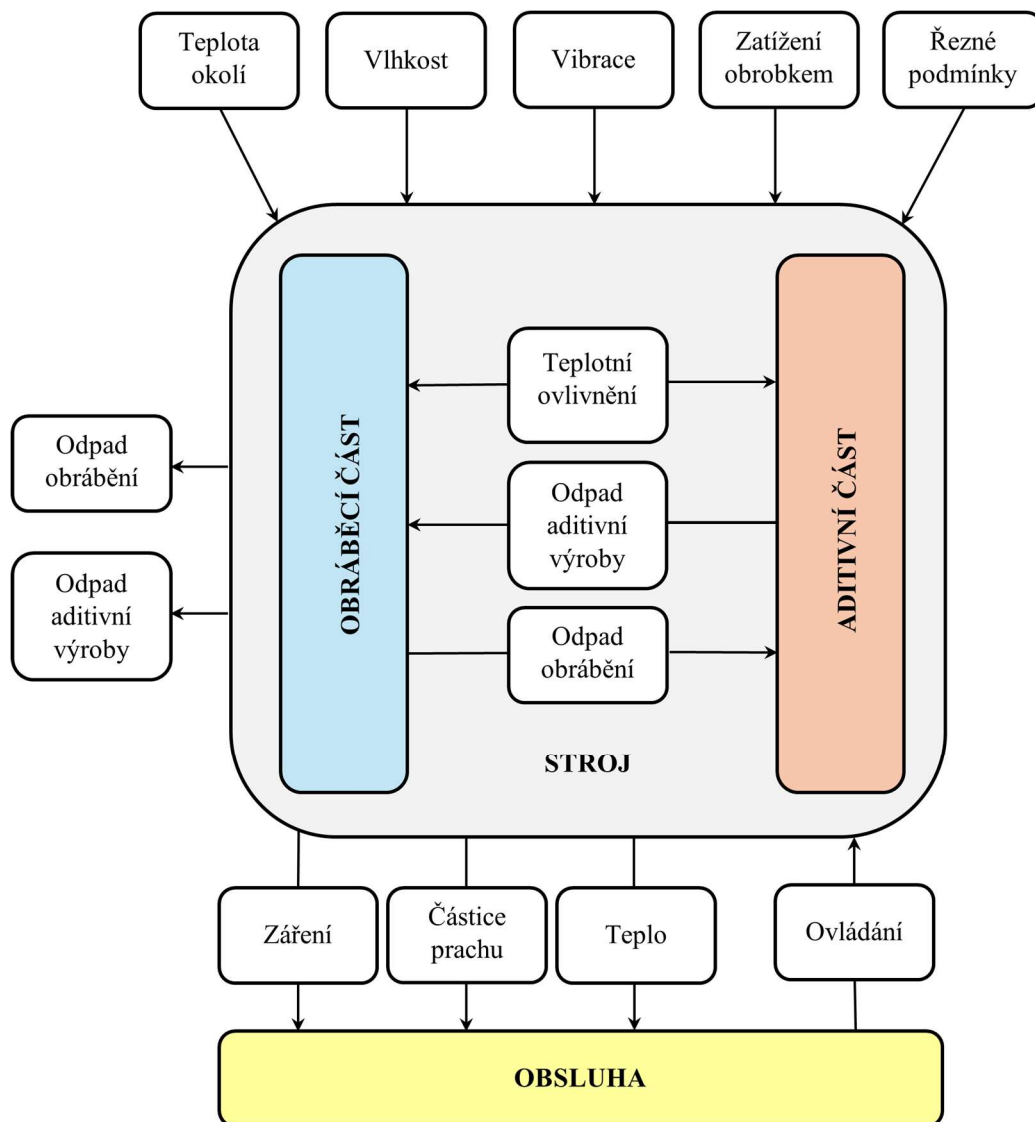
Při návrhu technického objektu je nutné brát v úvahu, jak se budou jednotlivé části objektu navzájem ovlivňovat. V případě obráběcího stroje vstupují do systému požadavky na obrobek. Tyto požadavky poté ovlivňují použitou technologii výroby, která může výrazně ovlivnit potřebnou konstrukci stroje. U hybridních obráběcích strojů navíc dochází k ovlivnění obráběcí (konvenční) části stroje aditivní částí a také naopak. Je tedy nutné hybridní obráběcí stroj vnímat jako propojený celek, kde volba jednotlivých částí a výrobních technologií může mít zásadní dopad na ostatní části a technologie. Bez zadaného typického výrobku musí být zvolena technologie a konstrukce stroje tak, aby byl výsledný stroj konkurenceschopný, využitelný, flexibilní a inovativní.



Obr. 19) Ovlivnění částí stroje

4.5 Vnitřní a vnější interakce stroje

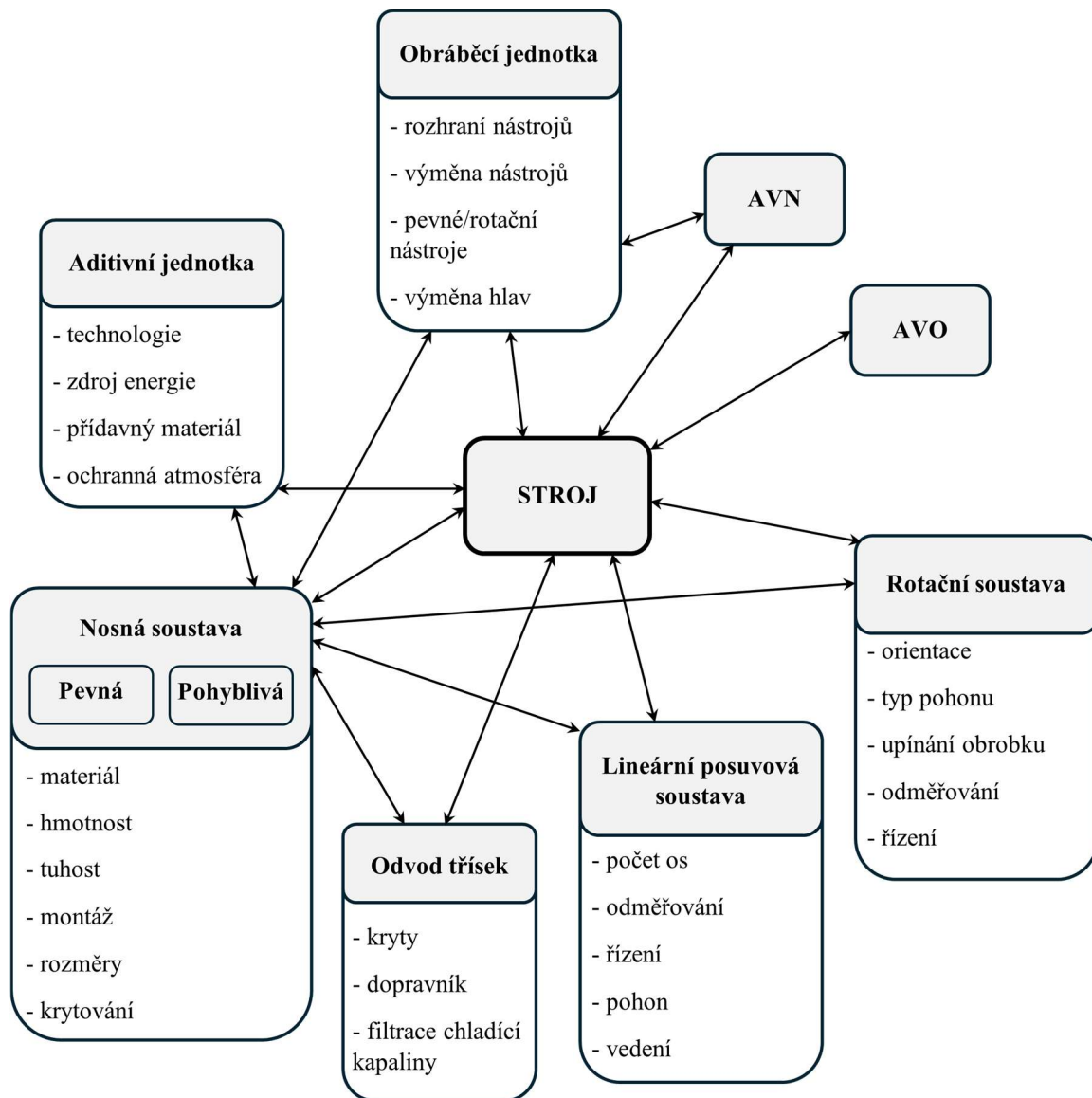
Použitá konstrukce a technologie nejsou jedinými aspekty ovlivňující stavbu stroje. Důležité je mít přehled o možných interakcích, které mohou nastat během provozu stroje. Interakce mohou probíhat mezi strojem a okolím, strojem a obsluhou, a také mezi jednotlivými částmi stroje. V případě hybridních obráběcích center se jedná o interakce mezi aditivní a obráběcí (konvenční) částí stroje. Při návrhu je nutné brát v potaz jednotlivé interakce a jejich možné dopady na stroj, okolí a obsluhu.



Obr. 20) Interakce stroj, okolí, obsluha

4.6 Rozbor stavby stroje

V předešlých částech systémového rozboru byly představeny obecné vnitřní a vnější vazby a interakce hybridního obráběcího centra. Tato část se věnuje konkrétním částem stroje, jejich hlavním parametrům a vzájemným vazbám. Stavba stroje je znázorněna pomocí diagramu (obrázek 21).



Obr. 21) Rozbor stavby stroje

4.7 Shrnutí systémového rozboru

Z předešlých rozborů vyplývá, že při konstrukci hybridního CNC obráběcího centra je třeba vzít v úvahu následující fakta:

- Stroj by měl být navržen tak, aby splňoval základní požadavky, jako je flexibilita, produktivita, spolehlivost, bezpečnost atd.
- Je třeba brát ohled na různorodost součástí vyráběných na stroji
- Aditivní a obráběcí část stroje, a jejich součásti se vzájemně ovlivňují, a to jak konstrukčně, tak i technologicky
- Je nutné vyřešit změnu výrobní technologie z třískového obrábění na aditivní nanášení a obráceně
- Při návrhu stroje je nutné brát v potaz vnější vlivy, jako jsou teplota, vibrace, vlhkost atd.
- Při provozu stroje vzniká odpad, záření, teplo a částice prachu, které mohou nepříznivě působit na obsluhu
- Stroj je třeba navrhnout s ohledem na vzájemné ovlivnění hlavních stavebních částí, jako je nosná soustava, rotační soustava, nástrojová soustava atd.
- Při návrhu hrají podstatnou roli vlastnosti jednotlivých stavebních částí stroje, jako jsou hmotnost, složitost konstrukce a řízení, největší rozměry atd.

Shrnutí systémového rozboru společně s jeho předešlými částmi dále slouží jako návod pro vypracování jednotlivých variant řešení hybridního obráběcího centra, volbu vhodných kritérií pro multikriteriální analýzu a následné konstrukční zpracování stroje.

Dále tedy budou uvažována pro výběr optimální varianty následující kritéria:

- Prostorové nároky
- Hmotnost pohyblivých částí
- Jednoduchost konstrukce
- Jednoduchost řízení
- Jednoduchost změny technologie
- Vzájemné ovlivnění technologií.

5 NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY ŘEŠENÍ

5.1 Volba aditivní technologie

Jak bylo naznačeno v předešlé kapitole, volba aditivní technologie významně ovlivňuje stavbu stroje, ale také jeho využití a účel ve výrobním procesu. Aditivní technologie založená na principu PBF není vhodná pro kombinaci se soustružením. Zbývají tedy aditivní technologie na principu DED. V této práci je pro řešení hybridního obráběcího centra zvolena aditivní technologie přímého nanášení materiálu (DED) se zdrojem tepla v podobě laseru. Tato aditivní technologie je dostatečně výkonná a umožňuje přesné nanášení vrstev s menší potřebou následného obrábění.

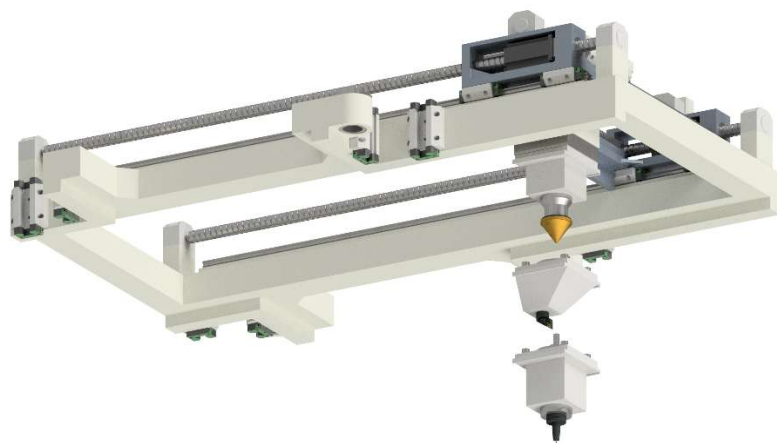
Přestože je zvolena aditivní technologie DED s laserem, neomezuje to využití ostatních DED technologií v navrhovaném výrobním stroji. Aditivní jednotky přímého nanášení materiálu jsou tedy v navrhovaném stroji zaměnitelné, a to jak z hlediska zdroje energie, tak i přídavného materiálu.

5.2 Varianta A

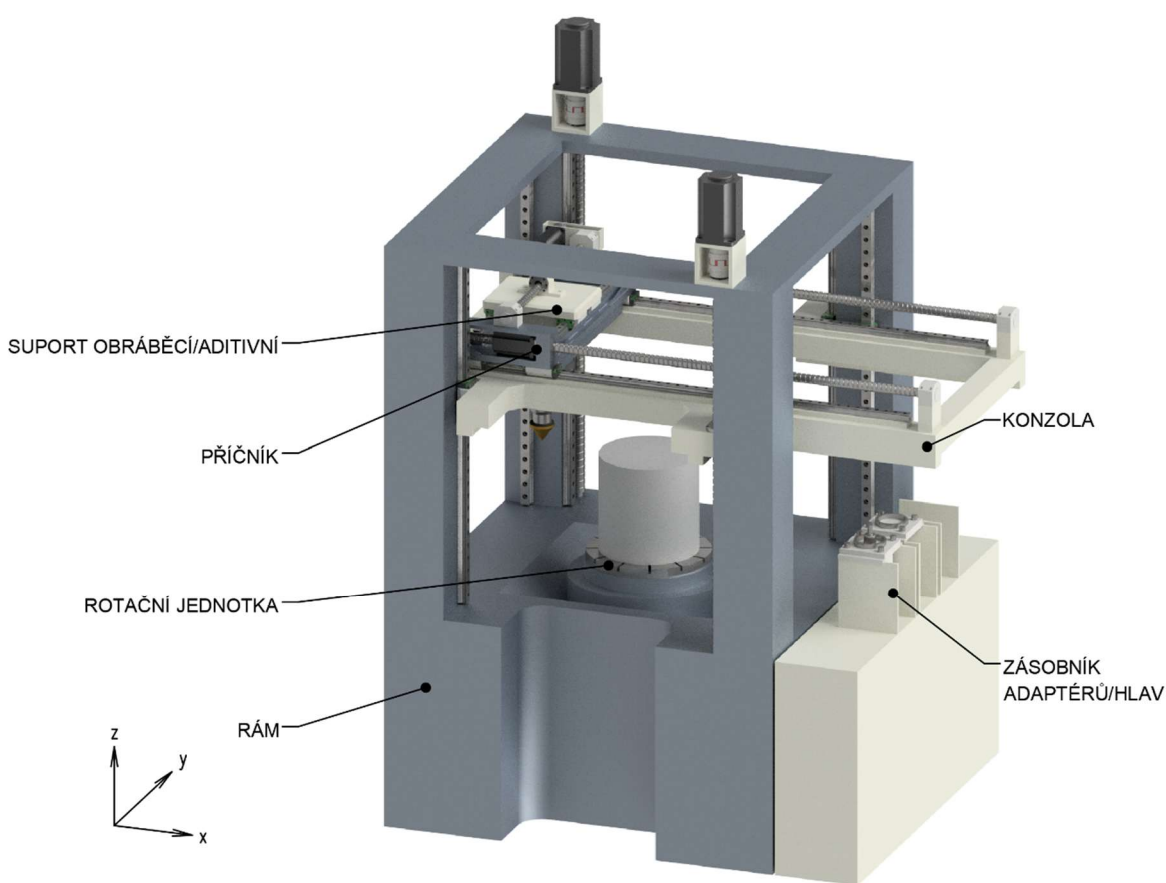
Navržený výrobní stroj má osu rotace obrobku umístěnou vertikálně. Rám stroje se skládá z podstavy, ve které je umístěna rotační jednotka, a ze čtyř sloupů v rozích podstavy. Na vnitřních stranách každého sloupu je umístěno profilové valivé vedení. Po tomto vedení se pohybuje konzola ve směru osy Z. Pohyb konzoly je zajištěn pomocí dvou kuličkových šroubů a matic. Na horní straně konzoly je umístěno profilové valivé vedení, po kterém se pohybuje příčník v ose X. Příčník je opět poháněn dvojicí kuličkových šroubů. Na horní straně příčníku je opět umístěno profilové valivé vedení. Po vedení příčníku se pohybuje suport ve směru osy Y, ten je opět poháněn kuličkovým šroubem a maticí. Suport je u tohoto stroje část, která nese nástroj. Trojice nosných částí – konzola, příčník a suport zajišťuje pohyb nástroje v kartézském pravoúhlém souřadném systému.

Suport umožňuje výměnu nástrojových hlav a adaptérů přes upínací rozhraní. Výměna probíhá najetím suportu nad zásobník hlav, a uchopením dané hlavy metodou pick-up. Výměnné hlavy mohou být různé podle potřeb uživatele. Významná je možnost použití hlav pro rotační nástroje, a tím možnost provádět technologické operace jako je frézování, vrtání, závitování atd. Suport dále umožňuje výměnu obráběcí hlavy za aditivní hlavu přes stejné rozhraní.

Navržená varianta hybridního obráběcího stroje disponuje unikátní konstrukcí, která umožňuje pohyb nástroje nebo aditivní trysky ve třech osách, a rotaci obrobku okolo čtvrté osy. Navržený stroj má relativně malé hlavní rozměry. Nevýhodou této varianty může být komplikované vedení potřebných médií k obráběcí a aditivní hlavě. Další části výrobního stroje jako je výměna nástrojů, obrobků, dopravník třísek atd. budou řešeny po zvolení vhodné varianty.



Obr. 22) Konzola, příčník a suport varianty A

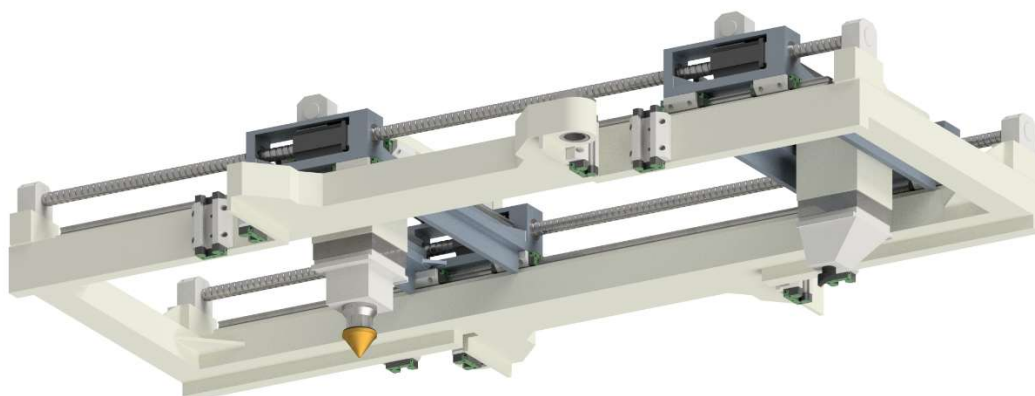


Obr. 23) Varianta A

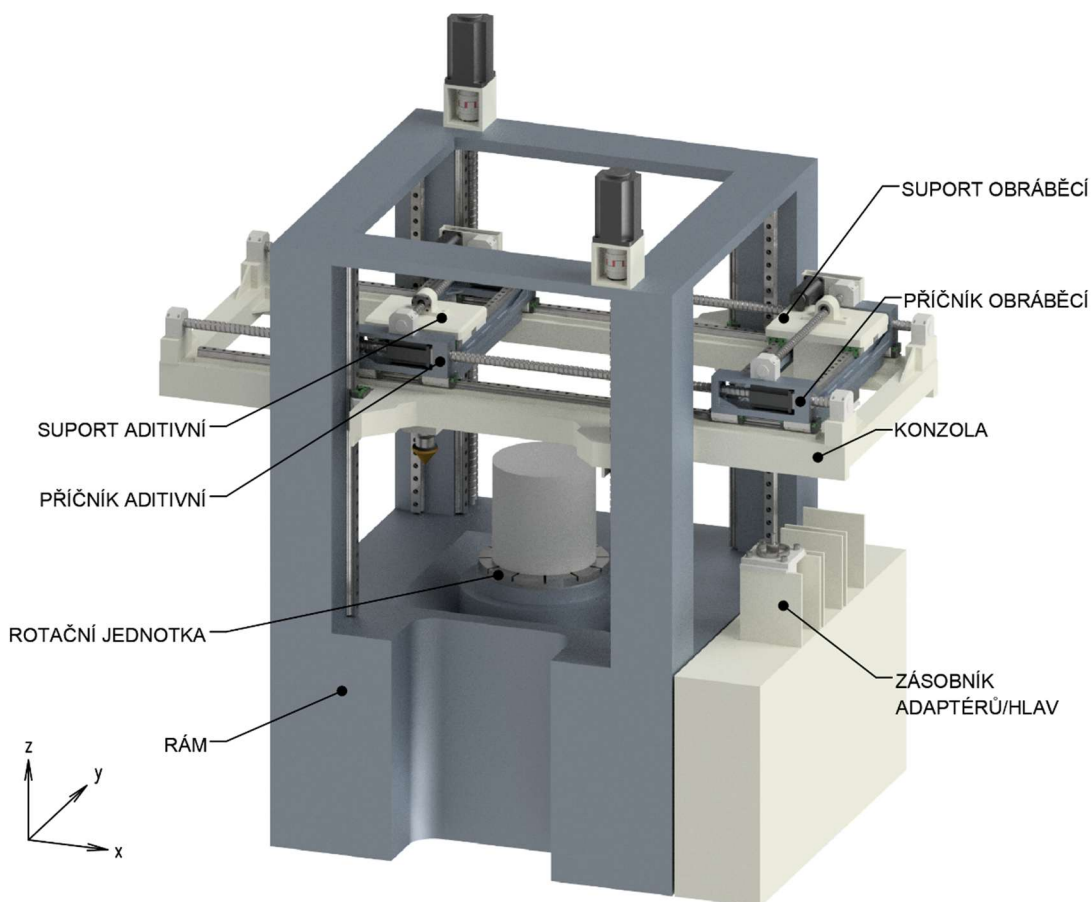
5.3 Varianta B

Varianta B vychází z varianty A a to jak konstrukcí, tak i pohybem základních částí. Rozdílem je použití dvou příčníků a suportů. Jeden příčník s příslušným suportem bude využíván čistě na aditivní výrobu. Druhý příčník se suportem bude využíván na obráběcí operace. U příčníku a suportu pro obráběcí operace jsou opět použity výměnné hlavy a adaptéry přes upínací rozhraní. Výměna různých hlav a adaptérů poskytuje výrobní flexibilitu a umožňuje obrábění pevnými i rotačními nástroji.

Na výrobním procesu se vždy bude podílet pouze jeden příčnick s suportem. Nečinná dvojice příčnicků a suportů bude umístěna v koncové poloze na konzole. To má za následek větší potřebnou délku konzoly a tím větší celkové rozměry stroje. Další nevýhodou při použití dvou příčnicků a suportů je větší celková hmotnost konzoly a tím větší zatížení pohonů. Umístění dvou příčnicků na společné vedení může mít za následek obtížnější řízení jejich pohybů. Výhodou této návrhové varianty je možnost vhodnějšího vedení médií k suportům, především pak k aditivnímu suportu. Další výhodou může být zkrácení nevýrobních časů při změně technologie.



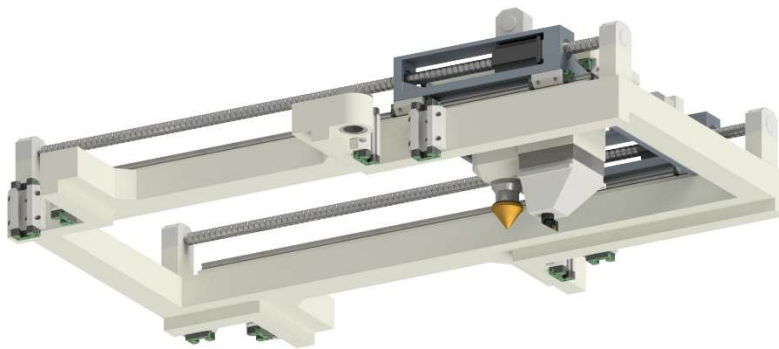
Obr. 24) Konzola, příčnick a suport varianty B



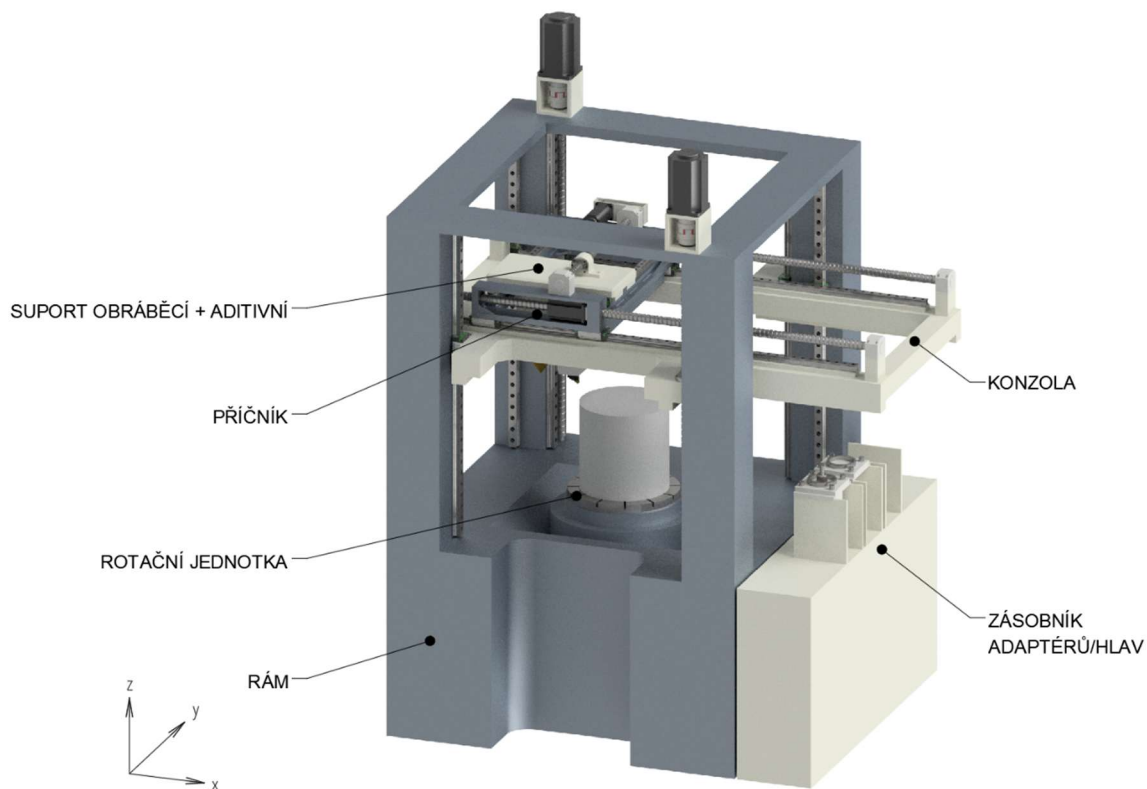
Obr. 25) Varianta B

5.4 Varianta C

Varianta C opět vychází z návrhové varianty A. Má tedy tři lineární posuvové osy v nástroji a jednu rotační osu v obrobku. Rozdílem u této varianty je umístění aditivní jednotky pevně na suport. Toto řešení je konstrukčně jednoduché a výrazně nezvyšuje zástavbové prostory a hmotnost pohyblivé nosné soustavy. Dále je u této varianty možnost jednoduššího vedení médií k aditivní jednotce. Umístění aditivní jednotky pevně na suport dále umožňuje jednoduchou změnu technologie z obrábění na aditivní výrobu a obráceně. Nevýhodou této varianty je zvětšení rozměrů suportu a příčnicku a tím omezení jejich posuvu. Další nevýhodou může být vzájemné ovlivnění mezi aditivní a obráběcí hlavou při výrobním procesu. Aditivní tryska a obráběcí nástroj jsou umístěny blízko sebe, mohlo by tak docházet ke kolizi těchto částí s polotovarem. Řešením při obrábění je použití delšího adaptéru nebo prodloužení obráběcích nástrojů. Při aditivní výrobě je poté řešením odepnutí obráběcí hlavy či adaptéru ze suportu.



Obr. 26) Konzola, příčník a suport varianty C



Obr. 27) Varianta C

5.5 Multikriteriální analýza variant

5.5.1 Volba kritérií

Jednotlivá kritéria jsou zvolena vzhledem k obecným požadavkům navrhovaného stroje a na základě zásadních odlišností jednotlivých variant. Podkladem pro volbu kritérií je systémový rozbor, z kterého vyplývají podstatné vlastnosti navržených variant obráběcího stroje. Kritéria jsou v tabulce 2 uspořádána od nejvýznamějších po nejméně významné.

Tab 2) Kritéria pro volbu vhodné varianty

Číslo	Kritérium	Slovní popis
1	Prostorové nároky	Potřebný zástavbový prostor, a největší rozměry stroje
2	Hmotnost pohyblivých částí	Vliv hmotnosti pohyblivých částí stroje na zátěž pohonů, a na bezpečnost
3	Jednoduchost konstrukce	Vliv částí stroje a jejich složitosti na výslednou složitost celkové konstrukce
4	Jednoduchost řízení	Vliv částí stroje a jejich složitosti na výslednou složitost řízení
5	Změna technologie	Jednoduchost změny výrobní technologie z obráběcí na aditivní a naopak
6	Ovlivnění technologií	Vzájemné ovlivnění aditivní a obráběcí technologie

5.5.2 Určení váhy kritérií

Pro stanovení váhy jednotlivých kritérií je použita Saatyho metoda [32]. Kritéria jsou uspořádána do tabulky 4, a jsou ohodnocena podle tabulky 3. Při hodnocení se porovnává řádkový prvek tabulky se sloupcovým prvkem. V případě preference sloupcového prvku se do tabulky zapíše převrácená hodnota hodnocení. Dále se vypočítá geometrický průměr hodnocení každého kritéria. Výsledná váha kritérií se spočítá podle vzorce (1).

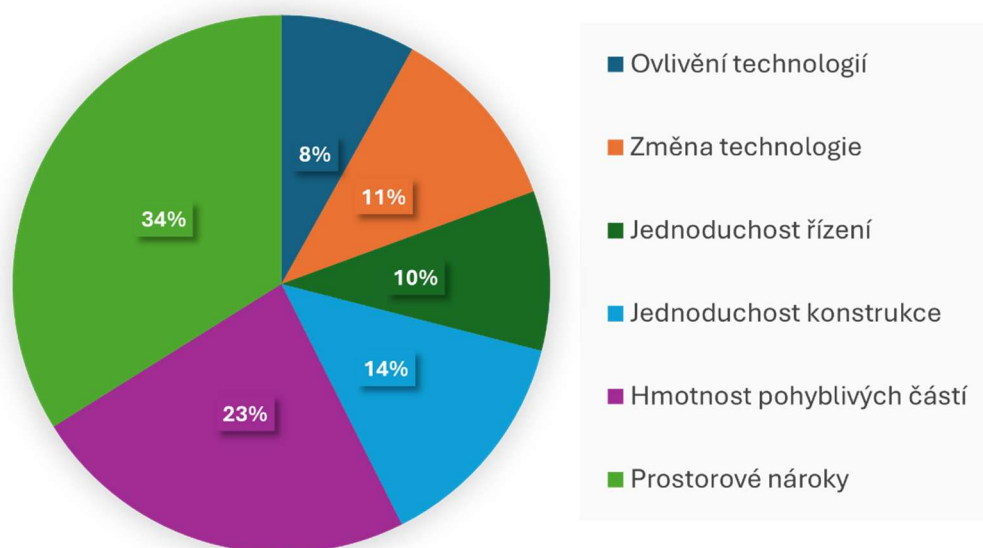
$$v_i = \frac{G_i}{\sum G_i} \quad (1)$$

Tab 3) Stupnice pro vzájemné porovnání kritérií

Hodnocení	Slovní popis
1	Stejně důležité
2	Mírně důležitější
3	Výrazně důležitější
4	Velmi výrazně důležitější
5	Extrémně důležitější

Tab 4) Porovnání kritérií a určení jejich váhy

Kritérium	6	5	4	3	2	1	Geometrický průměr G_i	Váha v_i
6	1	1/2	1	1/2	1/3	1/3	0,550	0,081
5	2	1	1	1	1/3	1/3	0,778	0,113
4	1	1	1	1/2	1/2	1/3	0,661	0,096
3	2	1	2	1	1/2	1/3	0,935	0,136
2	3	3	2	2	1	1/2	1,619	0,235
1	3	3	3	3	2	1	2,335	0,339
Suma							6,878	1



Obr. 28) Váha kritérií ve výsečovém grafu

5.5.3 Hodnocení variant

Jednotlivá kritéria jsou ohodnocena u každé z variant na stupnici od 1 do 5 (tabulka 6), kde 1 je nejhorší a 5 nejlepší hodnocení. Na základě hodnocení H_{ij} jsou spočítány koeficienty k_{ij} podle vzorce (2). Bodové hodnocení b_{ij} je poté spočítáno podle vzorce (3). Výsledné hodnocení je získáno součtem bodových hodnocení b_{ij} u každé z variant (vzorec č. 4). Varianta s vyšším celkovým hodnocením je vhodnější pro další řešení.

Tab 5) Stupnice pro hodnocení variant

Hodnocení	Slovní popis
1	Špatné
2	Spíše špatné
3	Průměrné
4	Spíše dobré
5	Dobré

Tab 6) Hodnocení variant

Kritérium		Varianta		
		A	B	C
		Hodnocení H_{iA}	Hodnocení H_{iB}	Hodnocení H_{iC}
1	Prostorové nároky	5	4	5
2	Hmotnost pohyblivých částí	4	3	4
3	Jednoduchost konstrukce	2	4	4
4	Jednoduchost řízení	3	2	3
5	Změna technologie	3	4	4
6	Ovlivnění technologií	4	4	2

$$k_{ij} = \frac{H_{ij}}{\min(H_i)} \quad (2)$$

$$b_{ij} = v_i \cdot k_{ij} \quad (3)$$

$$H_{vj} = \sum b_{ij} \quad (4)$$

Tab 7) Multikriteriální analýza variant

Kritérium		Váha	Varianta					
			A		B		C	
			k_{iA}	b_{iA}	k_{iB}	b_{iB}	k_{iC}	b_{iC}
1	Prostorové nároky	0,339	1,25	0,424	1	0,339	1,25	0,424
2	Hmotnost pohyblivých částí	0,235	1,33	0,313	1	0,235	1,33	0,313
3	Jednoduchost konstrukce	0,136	1	0,136	2	0,272	2	0,272
4	Jednoduchost řízení	0,096	1,5	0,144	1	0,096	1,5	0,144
5	Změna technologie	0,113	1	0,113	1,33	0,151	1,33	0,151
6	Ovlivnění technologií	0,081	2	0,162	2	0,162	1	0,081
Výsledné hodnocení H_{vj}			1,292		1,255		1,385	
Pořadí			2		3		1	

Na základě provedené multikriteriální analýzy byla pro další řešení a pro konstrukční zpracování zvolena návrhová varianta C. Konstrukčně bude zpracována rotační jednotka a ostatní části hybridního CNC obráběcího centra budou zvoleny a navrženy obecně.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ OPTIMÁLNÍ VARIANTY

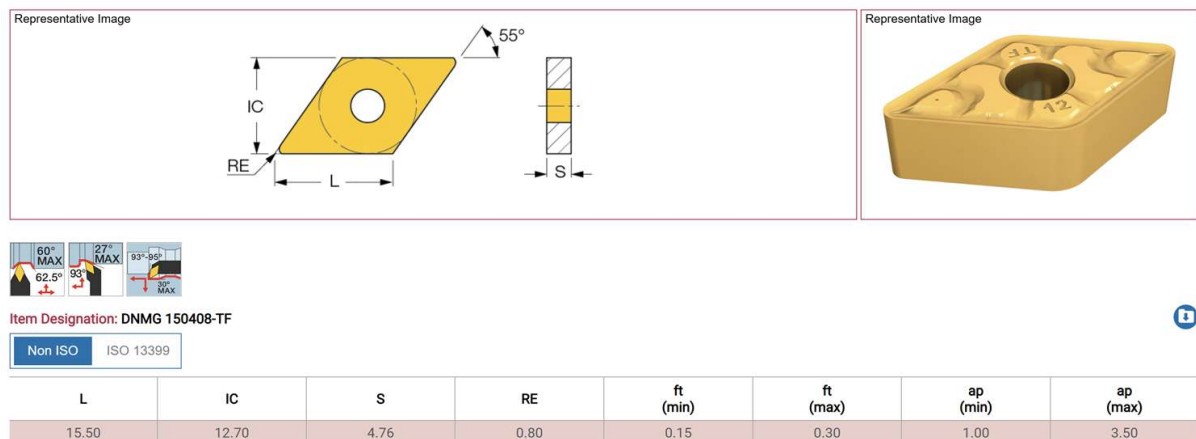
Konstrukční řešení hybridního CNC obráběcího centra se v této práci týká kompletního návrhu rotační soustavy a hrubého návrhu lineárních pohybových soustav. Ostatní části stroje, jako je nosná soustava, krytování, systémy automatické výměny nástrojů (AVN) a automatické výměny obrobků (AVO), odvod třísek a další budou navrženy obecně na základě konstrukce rotační a lineární soustavy.

6.1 Konstrukční řešení rotační soustavy (vřetene)

6.1.1 Řezné podmínky

V systémovém rozboru řešené problematiky byl zvolen maximální polotovar o průměru 400 mm, délce 400 mm a hmotnosti 300 kg. Dalšími důležitými vstupními faktory pro návrh rotační soustavy jsou materiál polotovaru a řezné podmínky obrábění. Jako obráběný materiál je zvolena nízkolegovaná ocel (např. 25CrMo4). Řezné podmínky závisí na používaném nástroji.

Jako nástroj byla zvolena vyměnitelná břitová destička DNMG 150408-TF IC830 od výrobce ISCAR [32]. Tato destička je vhodná pro obrábění různých materiálů při středních řezných podmínkách.

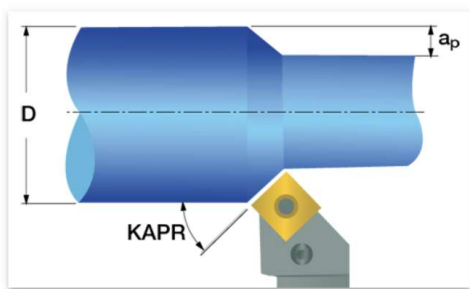


Obr. 29) Vlastnosti vyměnitelné břitové destičky [32]

Vlastnosti břitové destičky:

- Posuv na otáčku: 0,15 až 0,3 mm
- Hloubky řezu: 1 až 3,5 mm
- Řezná rychlost: 80 až 150 m/min (pro zvolený materiál)

Pro výpočet řezných sil jsou uvažovány maximální hodnoty posuvu $f_t = 0,3 \text{ mm}$ a hloubky řezu $a_p = 3,5 \text{ mm}$, hodnota řezné rychlosti je zvolena $v_c = 130 \text{ m/min}$. Pro výpočet je použit online kalkulačtor od společnosti ISCAR [33].



Workpiece diameter (D):	<input type="text" value="400"/>	mm
Depth of cut (a_p):	<input type="text" value="3,5"/>	mm
Feed per revolution (f_r):	<input type="text" value="0,3"/>	mm
<input checked="" type="radio"/> Cutting speed (v_c):	<input type="text" value="130"/>	m/min
<input type="radio"/> Spindle speed (n):	<input type="text" value="103,5"/>	rpm
Workpiece material:	<input type="text" value="25CrMo4; 25 CrM"/>	DIN
Effective rake angle (γ):	<input type="text" value="0"/>	deg.
Tool cutting edge angle (KAPR):	<input type="text" value="93"/>	deg.

Kc:	2 370	N/mm ²
Net mean power demand:	5,35	KW
Material removal rate:	135,31	cm ³ /min
Mean torque:	493,21	Nm
Tangential force:	2 488,98	N

Obr. 30) Výpočet řezné síly pomocí online kalkulátoru ISCAR [33]

Z provedeného výpočtu vyplývá, že maximální složka řezné síly, tedy tangenciální složka, má velikost 2488,98 N. Zbylé složky řezné síly se určí následovně.

$$F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,5 \quad (5)$$

$$F_{cmax} = 2488,98 \text{ N} \quad (6)$$

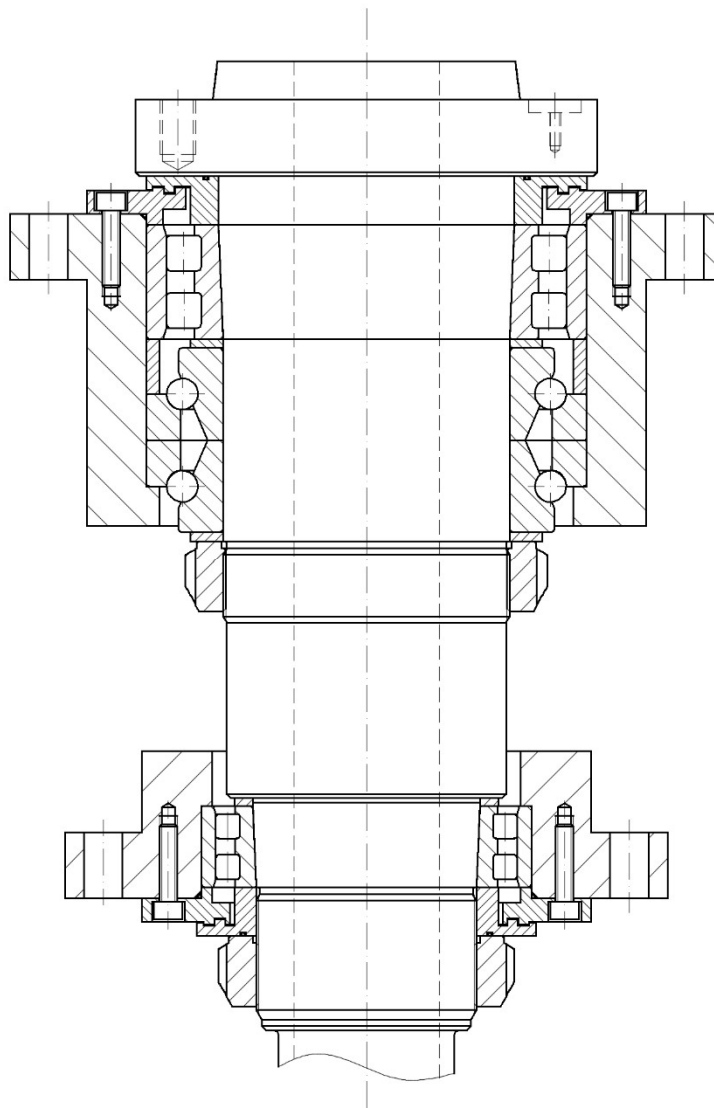
$$F_{pmax} = 0,4 \cdot F_{cmax} = 0,4 \cdot 2488,98 = 995,592 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{fmax} = 0,5 \cdot F_{cmax} = 0,5 \cdot 2488,98 = 1244,49 \text{ N} \quad (8)$$

6.1.2 Uložení vřetene

Rotační soustava je u tohoto stroje koncipována jako svisle orientované vřeteno. Vřeteno je uloženo na dvou sadách ložisek. V horní části vřetene (u obrobku) je uložení radiálně-axiální. Radiální působení sil zachytává především dvouřadé válečkové ložisko. Axiální působení v obou směrech zachytává výhradně dvouřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem. Ve spodní části vřetene (u náhonu) je vřeteno uloženo pouze radiálně přes dvouřadé válečkové ložisko. Ve spodní části je uložení pouze radiální z důvodu teplotních dilatací. I když existuje mnoho možností, jak uložit vřeteno CNC obráběcího stroje, je zvolena varianta tohoto tuhého uložení, které zároveň vyhovuje i otáčkové.

Ložiska jsou zvolena od výrobce SKF [43][44][45] z řady superpřesných ložisek. Obě válečková ložiska jsou předepnuta pomocí kuželové plochy na hřídeli a pojistné matice. Kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem je předepnuto z výroby, není tedy potřeba dalších konstrukčních prvků, pouze dodržení tolerancí od výrobce. Vnější kroužky ložisek jsou uloženy ve dvou nábojích vřeteníku. Toto uložení zjednodušuje předepnutí ložisek a montáž celého vřetene. K vymezení polohy jednotlivých ložisek jsou použity distanční kroužky. Těsnění je na obou koncích vyřešeno pomocí labyrintů vytvořených ve víčkách vřetene. Těsnění mezi pevnými částmi je řešeno pomocí o-kroužků.



Obr. 31) Uložení vřetene

6.1.3 Upínání obrobku

Pro upínání obrobků je zvoleno tříčelist'ové silové sklíčidlo ROTA NCO 500 Z380-SV90° od výrobce SCHUNK [35]. Spojení sklíčidla s vřetenem je zajištěno přes adaptérovou desku FF-T2 Z380-A8 [36]. K ovládní silového sklíčidla je dále zvolen hydraulický válec OPUS-V 175 opět od výrobce SCHUNK [37]. Sklíčidlo je hydraulickým válcem ovládáno přes tažnou tyč vedenou středem vřetene. Důležité parametry sklíčidla, adaptérové desky, a hydraulického válce jsou zobrazeny v tabulkách 8,9, a 10.

Tab 8) Parametry sklíčidla SCHUNK ROTA NCO 500 Z380-SV90° [34]

Parametr	Hodnota
Maximální otáčky	2000 min ⁻¹
Hmotnost	164 kg
Moment setrvačnosti	5,3 kgm ²
Velikost vřetene	Nr. 15 (Z380)

Tab 9) Parametry adaptérové desky SCHUNK FF-T2 Z380-A8 [35]

Parametr	Hodnota
Hmotnost	28 kg
Strana sklíčidla	Z380
Strana stroje	ISO 702-1 Nr. 8

Tab 10) Parametry hydraulického válce SCHUNK OPUS-V 175 [36]

Parametr	Hodnota
Maximální otáčky	5000 min ⁻¹
Hmotnost	24 kg
Moment setrvačnosti	0,12 kgm ²

6.1.4 Volba pohonu rotační soustavy

Vřeteno je poháněno elektromotorem přes řemenový převod. Nepřímý náhon přes řemen má za následek umístění elektromotoru dál od vřetene, a tím omezení teplotního ovlivnění. Další výhodou nepřímého pohonu je tlumení vibrací od motoru a menší hluk při provozu. Prokluz řemene je pro navrhovaný výrobní stroj nežádoucí, je tedy vhodné použít ozubený (synchronní) řemen. Vzhledem k relativně velkému průměru obrobku jsou předpokládány nižší otáčky vřetene. Z tohoto důvodu je motor doplněn o vloženou převodovku.

Velikost řemenového převodu je zvolena $i_r = 2,4$. Účinnost řemenového převodu je $\eta_r = 0,98$ [42]. Velikost převodu vložené převodovky je zvolena $i_p = 3$. Účinnost vložené převodovky je $\eta_p = 0,97$ [41]. Účinnost vřetene je dána účinností jednotlivých ložisek. Účinnost válečkového ložiska je uvažována $\eta_1 = 0,95$. Účinnost kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem je uvažována $\eta_2 = 0,98$. Celková účinnost ložisek je poté vypočítána dle vzorce 9.

$$\eta_{vr} = \eta_1^2 \cdot \eta_2 = 0,95^2 \cdot 0,98 = 0,885 \quad (9)$$

Volba elektromotoru vychází z kroutícího momentu na vřeteni, který je vyvozený tangenciální složkou řezné síly.

$$M_{vmax} = F_{cmax} \cdot \frac{D_{max}}{2} = 2488,98 \cdot \frac{0,4}{2} = 497,796 Nm \quad (10)$$

$$P_{vmax} = F_{cmax} \cdot v_c = 2488,98 \cdot \frac{130}{60} = 5392,8 W = 5,3928 kW \quad (11)$$

Vypočtený kroutící moment a výkon na vřeteni přibližně odpovídají online kalkulátoru od společnosti ISCAR.

Kroutící moment na motoru je poté vypočítán následovně.

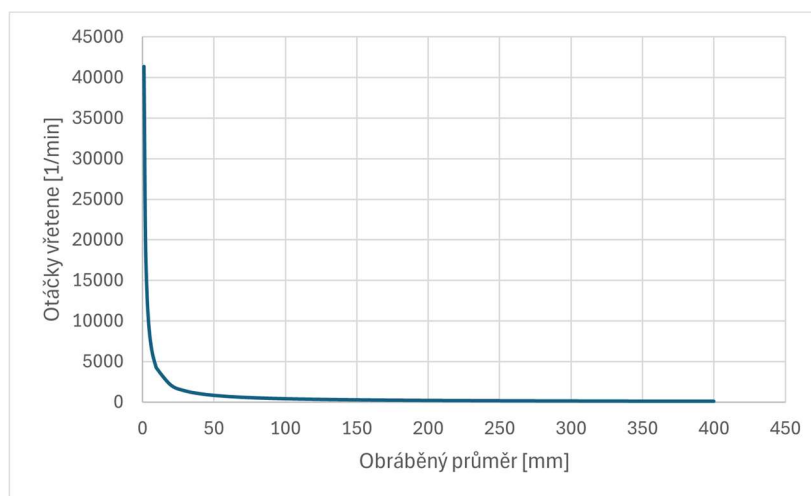
$$M_{mmax} = \frac{M_{vmax}}{i_p \cdot i_r \cdot \eta_p \cdot \eta_r \cdot \eta_{vr}} = \frac{497,796}{3 \cdot 2,4 \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,885} = 82,233 Nm \quad (12)$$

Na základě vypočteného kroutícího momentu je zvolen motor SIEMENS SIMOTICS M-1PH8133-3FF03-0PA1-Z [37]. V tabulce 11 jsou uvedeny vybrané parametry motoru.

Tab 11) Parametry motoru SIEMENS SIMOTICS M-1PH8133-3FF03-0PA1-Z [37]

Parametr	Hodnota
Nominální výkon	15 kW
Nominální moment	96 Nm
Maximální moment	240 Nm
Jmenovité otáčky	1500 min ⁻¹
Maximální otáčky	4500 min ⁻¹
Moment setrvačnosti (s brzdou)	0,0901 kgm ²
Moment setrvačnosti brzdy	0,0141 kgm ²

Při obrábění konstantní řeznou rychlostí a zmenšujícím se průměru obrobku rostou teoretické otáčky vřetene do nekonečna. Při zvoleném motoru a vložených převodech je možné obrábět konstantní řeznou rychlostí 130 m/min do průměru obrobku 70 mm. Obrábění řeznou rychlostí 80 m/min je možné do průměru 40 mm. Při obrábění menších průměrů dojde k postupnému snižování řezné rychlosti a k obrábění za nevhodných řezných podmínek. Pro tento návrh je rozsah otáček dostatečný.



Obr. 32) Závislost otáček vřetene na obráběném průměru pro řeznou rychlost 130 m/min

Ke zvolenému motoru je vybrána převodovka C402_0031ME40 od výrobce STOBER [41]. Podstatné parametry převodovky jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab 12) Parametry převodovky STOBER C402_0031ME40 [41]

Parametr	Hodnota
Maximální otáčky (cyklické)	4500 min ⁻¹
Převodový poměr	3,099
Moment setrvačnosti	0,004 kgm ²
Účinnost	97 %

Jak již bylo zmíněno, pro náhon vřetene je použit synchronní řemenový převod. Na základě rozměrového náčrtu vřetene je zvolen počet zubů hnané řemenice $z_2 = 144$. Profil řemene je zvolen HTD 8M s roztečí zubů $t_r = 8 \text{ mm}$. Osová vzdálenost řemenic je zvolena z modelu návrhové varianty $a_{rt} = 1000 \text{ mm}$. Návrh řemenového převodu je proveden dle výrobce řemenů Conti® Synchrodrive od společnosti Continental [42]. Nejprve je vypočítán počet zubů malé řemenice a roztečné průměry řemenic.

$$z_1 = \frac{z_2}{i_r} = \frac{144}{2,4} = 60 \quad (13)$$

$$d_{w1} = 152,79 \text{ mm} \quad (14)$$

$$d_{w2} = d_{w1} \cdot i_r = 152,79 \cdot 2,4 = 366,69 \text{ mm} \quad (15)$$

Dále je určena délka řemene a vypočítána osová vzdálenost a opásání hnací řemenice dle Conti® Synchrodrive [42].

$$\beta_{rt} = 2 \cdot \arccos \left[\frac{t_r \cdot (z_2 - z_1)}{2 \cdot a_{rt} \cdot \pi} \right] = 2 \cdot \arccos \left[\frac{8 \cdot (144 - 60)}{2 \cdot 1000 \cdot \pi} \right] = 167,72^\circ \quad (16)$$

$$L_{rt} = 2 \cdot a_{rt} \cdot \sin \left(\frac{\beta_{rt}}{2} \right) + \frac{t_r}{2} \cdot \left[z_2 + z_1 + \left(1 - \frac{\beta_{rt}}{180^\circ} \right) \cdot (z_2 - z_1) \right] \quad (17)$$

$$L_{rt} = 2 \cdot 1000 \cdot \sin \left(\frac{167,72}{2} \right) + \frac{8}{2} \cdot \left[144 + 60 + \left(1 - \frac{167,72}{180} \right) \cdot (144 - 60) \right]$$

$$L_{rt} = 2827,45 \text{ mm}$$

Na základě provedeného výpočtu je zvolena délka řemene $L_r = 3008 \text{ mm}$.

$$a_r = \frac{1}{4} \cdot \left[L_r - \frac{t_r}{2} \cdot (z_2 + z_1) + \sqrt{\left(L_r - \frac{t_r}{2} \cdot (z_2 + z_1) \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{t_r}{\pi} \cdot (z_2 - z_1) \right)^2} \right] \quad (18)$$

$$a_r = \frac{1}{4} \cdot \left[3008 - \frac{8}{2} \cdot (144 + 60) + \sqrt{\left(3008 - \frac{8}{2} \cdot (144 + 60) \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{8}{\pi} \cdot (144 - 60) \right)^2} \right]$$

$$a_r = 1086,7 \text{ mm}$$

$$\beta_r = 2 \cdot \arccos \left[\frac{t_r \cdot (z_2 - z_1)}{2 \cdot a_r \cdot \pi} \right] = 2 \cdot \arccos \left[\frac{8 \cdot (144 - 60)}{2 \cdot 1086,7 \cdot \pi} \right] = 168,7^\circ \quad (19)$$

Z opásání hnací řemenice β_r je dále možno zjistit počet zubů v záběru. [42]

$$z_{1e} = z_1 \cdot \frac{\beta_r}{360} = 60 \cdot \frac{168,7}{360} = 28,11 \quad (20)$$

Minimální počet zubů v záběru pro profil řemene HTD 8M HS je dle výrobce 28 [42].

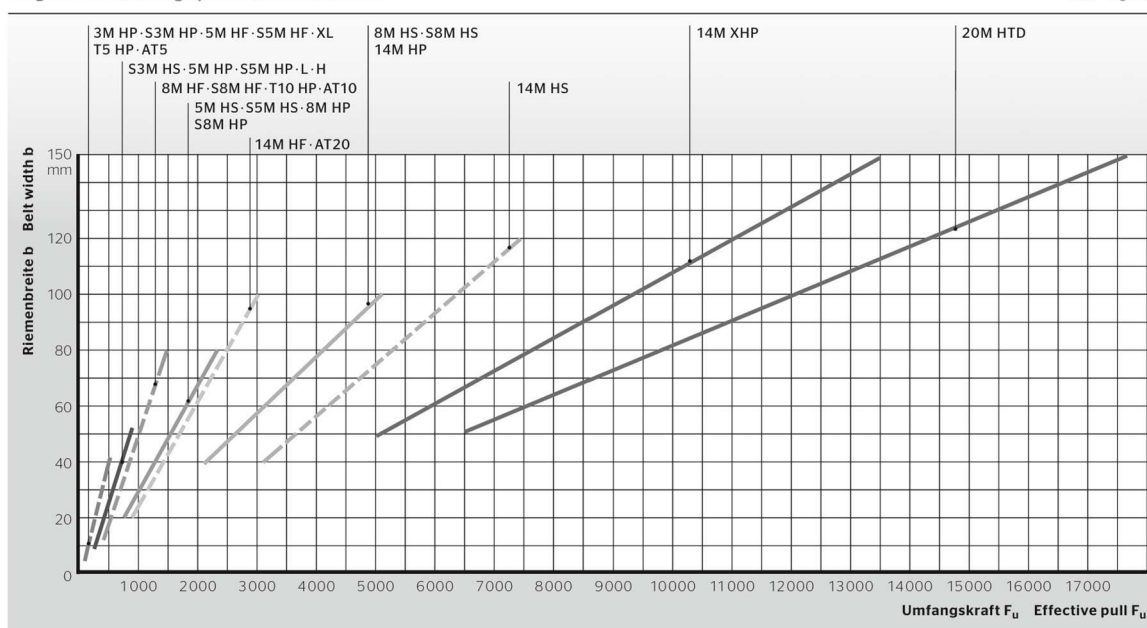
Dále, je potřeba zvolit šířku řemene. Ta je zvolena z diagramu výrobce na základě profilu řemene a působící tažné síly v řemeni [42]. Tažná síla je určena z nominálního momentu motoru.

$$M_1 = M_{jm} \cdot i_p = 96 \cdot 3,099 = 297,504 \text{ Nm} \quad (21)$$

$$F_u = \frac{2 \cdot M_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 297504}{152,79} = 3894,286 \text{ N} \quad (22)$$

CONTI® SYNCHRODRIVE Zahnriemen-Auswahldiagramm
Diagram for selecting synchronous drive belts

Abb. Fig. 5



Obr. 33) Diagram pro výběr synchronních řemenů CONTI SYNCHRODRIVE [42]

Šířka řemene je zvolena $b_r = 85 \text{ mm}$.

Posledním krokem výpočtu řemenového převodu je určení síly předpětí [42].

$$F_r = F_u \cdot \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) = 3894,286 \cdot \sin\left(\frac{168,7}{2}\right) = 3875,381 \text{ N} \quad (23)$$

6.1.5 Kontrola dynamiky motoru

Kontrola dynamiky motoru je provedena srovnáním momentu setrvačnosti motoru a momentu setrvačnosti redukováných hmot. Dále jsou provedeny výpočty časů rozběhu vřetene na jmenovité a maximální otáčky.

Pro výpočet momentu setrvačnosti redukováných hmot je potřeba znát momenty setrvačnosti jednotlivých částí. Ty jsou získány buď od výrobce, nebo z vytvořených modelů v programu Autodesk Inventor. Jako polotovar je opět uvažován válec o průměru 400 mm a hmotnosti 300 kg.

$$J_m = 0,076 \text{ kgm}^2 \quad (24)$$

$$J_{br} = 0,0141 \text{ kgm}^2 \quad (25)$$

$$J_p = 0,004 \text{ kgm}^2 \quad (26)$$

$$J_{r1} = 0,013 \text{ kgm}^2 \quad (27)$$

$$J_{r2} = 0,466 \text{ kgm}^2 \quad (28)$$

$$J_{vr} = 0,123 \text{ kgm}^2 \quad (29)$$

$$J_{sk} = 5,3 \text{ kgm}^2 \quad (30)$$

$$J_{ad} = 0,5 \text{ kgm}^2 \quad (31)$$

$$J_{hv} = 0,12 \text{ kgm}^2 \quad (32)$$

$$J_o = 6 \text{ kgm}^2 \quad (33)$$

$$J_{red} = J_m + J_{br} + J_p + \frac{J_{r1}}{i_p^2} + \frac{J_{r2} + J_{vr} + J_{sk} + J_{ad} + J_{hv} + J_o}{i_p^2 \cdot i_r^2} = 0,3368 \text{ kgm}^2 \quad (34)$$

$$\frac{J_{red}}{J_m} = \frac{0,3368}{0,076} = 4,4322 \quad (35)$$

Výsledný poměr momentu setrvačnosti redukovaných hmot a momentu setrvačnosti motoru je přijatelný.

Časy potřebné pro rozběh pohonu na jmenovité a maximální otáčky se vypočítá následovně.

$$t_{jm} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{jm} \cdot J_{red}}{M_{max} \cdot \eta_p \cdot \eta_r \cdot \eta_{vr}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot 0,3368}{240 \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,885} = 0,2622 \text{ s} \quad (36)$$

$$t_{max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot J_{red}}{M_{max} \cdot n_{jm} \cdot \eta_p \cdot \eta_r \cdot \eta_{vr}} \cdot \frac{1}{2} \cdot (n_{max}^2 - n_{jm}^2) \quad (37)$$

$$t_{max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,3368}{240 \cdot \frac{1500}{60} \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,885} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4500^2}{60} - \frac{1500^2}{60} \right) = 1,0489 \text{ s}$$

$$t_c = t_{jm} + t_{max} = 0,2622 + 1,0489 = 1,3111 \text{ s} \quad (38)$$

Celkový čas potřebný pro rozběh motoru na maximální otáčky 4500 min^{-1} je přibližně 1,3 s. Časy rozběhu pohonu jsou přijatelné.

6.1.6 Kontrola ložisek

Ložiska zachycují nejen složky řezné síly působící na vřeteno, ale také sílu od předpětí řemene, a tíhové síly jednotlivých částí. Velikost a umístění ložisek je navrženo dle rozměrového náčrtu vřetene. V bodě A je vřeteno uloženo na válečkovém ložisku a kuličkovém ložisku s kosoúhlým

stykem. Je uvažováno, že předepnuté válečkové ložisko bude zachycovat většinu radiálních sil v tomto bodě. Kuličkové ložisko pak bude zachycovat výhradně axiální síly v bodě A. V bodě B je použito válečkové ložisko, které bude zachycovat pouze radiální síly.

Prvním krokem je určení reakcí v ložiscích. Pro stanovení vzdáleností je uvažován polotovar o průměru 400 mm a výšce 400 mm. Ostatní vzdálenosti jsou odečteny z rozměrového náčrtu vřetene. Hmotnosti jednotlivých částí jsou převzaty od jednotlivých výrobců [34][35][36], nebo jsou získány z vytvořených modelů v programu Autodesk Inventor.

$$a = 650 \text{ mm} \quad (39)$$

$$b = 260 \text{ mm} \quad (40)$$

$$c = 142,5 \text{ mm} \quad (41)$$

$$m_o = 300 \text{ kg} \quad (42)$$

$$m_{sk} = 164 \text{ kg} \quad (43)$$

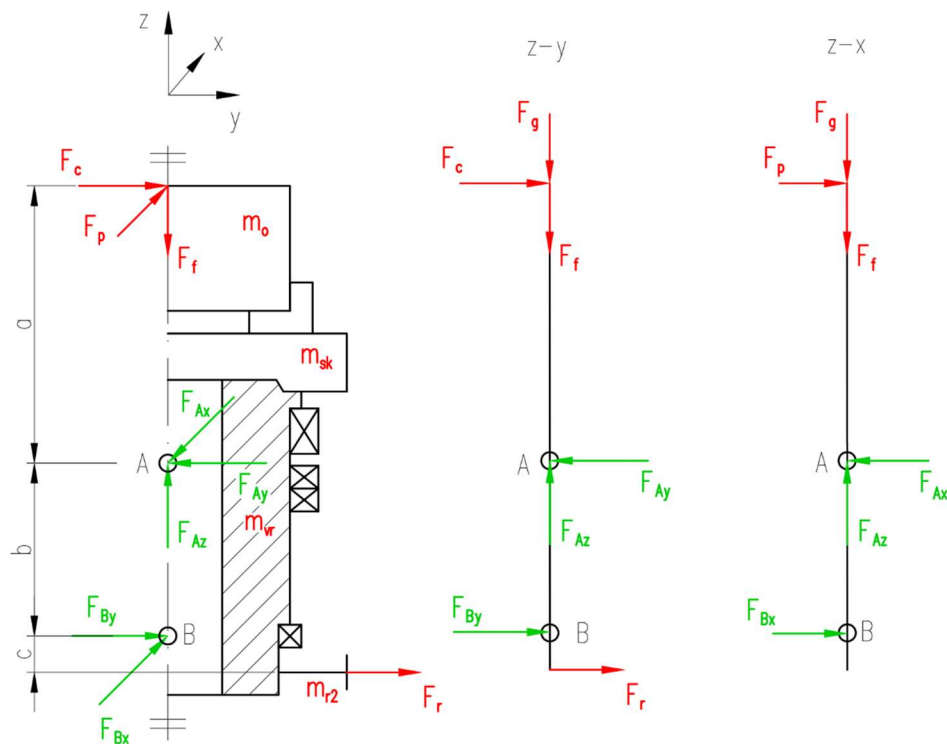
$$m_{ad} = 28 \text{ kg} \quad (44)$$

$$m_{vr} = 40 \text{ kg} \quad (45)$$

$$m_{r2} = 28 \text{ kg} \quad (46)$$

$$m_{hv} = 24 \text{ kg} \quad (47)$$

$$m_{tt} = 5 \text{ kg} \quad (48)$$



Obr. 34) Rozklad sil působících na uložení vřetene

Pro výpočet reakčních sil v ložiscích jsou použity maximální hodnoty složek řezné síly F_{cmax} , F_{pmax} , F_{fmax} . Směr otáčení vřetene je uvažován v kladném směru osy Z (proti směru hodinových ručiček). Dále je použita vypočtená síla předpětí řemene F_r a síla tíhová F_g .

$$F_g = g \cdot (m_o + m_{sk} + m_{ad} + m_{vr} + m_{r2} + m_{hv} + m_{tt}) = 5778,09 \text{ N} \quad (49)$$

Reakční síly v bodě A jsou vypočítány následovně.

$$F_{Az} = F_g + F_{fmax} = 5778,09 + 1244,49 = 7022,58 \text{ N} \quad (50)$$

$$F_{Ay} = \frac{F_{cmax} \cdot (a + b) - F_r \cdot c}{b} = \frac{2488,98 \cdot (650 + 260) - 3875,381 \cdot 142,5}{260} \quad (51)$$

$$F_{Ay} = 6587,4231 \text{ N}$$

$$F_{Ax} = \frac{F_{pmax} \cdot (a + b)}{b} = \frac{995,592 \cdot (650 + 260)}{260} = 3484,572 \text{ N} \quad (52)$$

$$F_A = \sqrt{F_{Ay}^2 + F_{Ax}^2} = \sqrt{6587,4231^2 + 3484,572^2} = 7452,2738 \text{ N} \quad (53)$$

Reakční síly v bodě B jsou vypočítány následovně.

$$F_{By} = \frac{F_{cmax} \cdot a - F_r \cdot (b + c)}{b} = \frac{2488,98 \cdot 650 - 3875,381 \cdot (260 + 142,5)}{260} \quad (54)$$

$$F_{By} = 223,062 \text{ N}$$

$$F_{Bx} = \frac{F_{pmax} \cdot a}{b} = \frac{995,592 \cdot 650}{260} = 2488,98 \text{ N} \quad (55)$$

$$F_B = \sqrt{F_{By}^2 + F_{Bx}^2} = \sqrt{223,062^2 + 2488,98^2} = 2498,9554 \text{ N} \quad (56)$$

V bodě A je jako první zvoleno válečkové dvouřadé ložisko NN 3026 KTN9/SP od výrobce SKF [43]. Parametry ložiska jsou uvedeny v tabulce 13. Výpočet životnosti tohoto ložiska je uveden ve vzorcích (57) a (58).

Tab 13) Parametry ložiska NN 3026 KTN9/SP [43]

Parametr	Hodnota
Maximální otáčky	4300 min ⁻¹
Dynamická únosnost	292 kN
Statická únosnost	500 kN
Průměr díry	130 mm
Vnější průměr	200 mm
Šířka	52 mm

$$P_1 = F_A = 7452,2738 \text{ N} \quad (57)$$

$$L_{10h1} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{vrmax}} \cdot \left(\frac{C_1}{P_1}\right)^{\frac{10}{3}} = \frac{10^6}{60 \cdot \left(\frac{n_{max}}{i_p \cdot i_r}\right)} \cdot \left(\frac{C_1}{P_1}\right)^{\frac{10}{3}} \quad (58)$$

$$L_{10h1} = \frac{10^6}{60 \cdot \left(\frac{4500}{3,099 \cdot 2,4}\right)} \cdot \left(\frac{292000}{7452,2738}\right)^{\frac{10}{3}} = 5,6284 \cdot 10^6 \text{ hod}$$

Jako druhé je v bodě A zvoleno kuličkové dvouřadé ložisko s kosoúhlým stykem BTW130 CTN9/SP od výrobce SKF [44]. Parametry ložiska jsou uvedeny v tabulce 14. Výpočet životnosti tohoto ložiska je uveden ve vzorcích (59) a (60).

Tab 14) Parametry ložiska BTW 130 CTN9/SP [44]

Parametr	Hodnota
Maximální otáčky	3600 min ⁻¹
Dynamická únosnost	106 kN
Statická únosnost	360 kN
Průměr díry	130 mm
Vnější průměr	200 mm
Šířka	84 mm

$$P_2 = F_{Az} = 7022,58 \text{ N} \quad (59)$$

$$L_{10h2} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{vrmax}} \cdot \left(\frac{C_2}{P_2}\right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot \left(\frac{n_{max}}{i_p \cdot i_r}\right)} \cdot \left(\frac{C_2}{P_2}\right)^3 \quad (60)$$

$$L_{10h2} = \frac{10^6}{60 \cdot \left(\frac{4500}{3,099 \cdot 2,4}\right)} \cdot \left(\frac{106000}{7022,58}\right)^3 = 94731,97 \text{ hod}$$

V bodě B je zvoleno válečkové dvouřadé ložisko NN 3020 KTN9/SP od výrobce SKF [45]. Parametry ložiska jsou uvedeny v tabulce 15. Výpočet životnosti tohoto ložiska je uveden ve vzorcích (61) a (62).

Tab 15) Parametry ložiska NN 3020 KTN9/SP [45]

Parametr	Hodnota
Maximální otáčky	5600 min ⁻¹
Dynamická únosnost	151 kN
Statická únosnost	250 kN
Průměr díry	100 mm
Vnější průměr	150 mm
Šířka	37 mm

$$P_3 = F_B = 2498,9554 \text{ N} \quad (61)$$

$$L_{10h3} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{vrmax}} \cdot \left(\frac{C_3}{P_3}\right)^{\frac{10}{3}} = \frac{10^6}{60 \cdot \left(\frac{n_{max}}{i_p \cdot i_r}\right)} \cdot \left(\frac{C_3}{P_3}\right)^{\frac{10}{3}} \quad (62)$$

$$L_{10h3} = \frac{10^6}{60 \cdot \left(\frac{4500}{3,099 \cdot 2,4}\right)} \cdot \left(\frac{151000}{2498,9554}\right)^{\frac{10}{3}} = 2,3849 \cdot 10^7 \text{ hod}$$

Ze zvolených ložisek má nejmenší životnost ložisko kuličkové s kosoúhlým stykem. Životnost tohoto ložiska dosahuje hodnoty takřka 95 000 hodin, což je pro tento návrh více než dostatečné. Zbylá dvě ložiska mají životnost výrazně převyšující reálně dosažitelné časy. Jsou tedy předdimenzována, ale jejich velikost se odvíjí od kuličkového ložiska a ostatních součástí vřetene.

6.1.7 Odměřování polohy

I přes to, že možné odměřování polohy pomocí enkodéru integrovaného do servomotoru, je zde přidán externí enkodér. Důvodem přidání enkodéru přímo na vřeteno je zvýšení přesnosti při pozicování obrobku (C osy) pro aditivní výrobu, ale také pro frézování, vrtání a další operace. Je zvolen absolutní optický enkodér ECA 4000 od společnosti HEIDENHAIN [46]. Rotační část enkodéru je namontována pomocí šroubů na hnanou řemenici. Snímač enkodéru je přes držák spojen se spodním nábojem vřetene. V této pozici by měl být zajištěn čistý provoz enkodéru, bez nebezpečí znečištění od vřetene a od řezného procesu. Enkodér je spojen přímo s vřetenem, což by mělo zajistit vysokou přesnost.

Tab 16) Parametry absolutního enkodéru ECA 4000 [46]

Parametr	Hodnota
Přesnost odměřování	± 2,8"
Vnější průměr	148,2 mm
Komunikační protokol	EnDat 2.2
Maximální otáčky	4400 min ⁻¹



Obr. 35) Absolutní enkodér HEIDENHAIN ECA 4000 [46]

6.2 Stavba rotační jednotky

Navržená rotační soustava se tedy skládá z vřetene, sklíčidla s upínacím válcem, řemenového převodu, vložené převodovky, a servomotoru. Hlavní části vřetene, včetně řešení upínání obroku, a velké řemenice jsou zobrazeny ve výkresu sestavy dostupného v příloze.

Hřídel vřetene je vyrobena z konstrukční oceli 42CrMo4 soustružením. Povrch hřídele je kalen a popuštěn. Závity pro přesné matice jsou chráněny před kalením. V horní části vřetene je vyroben přípojovací kuželový konec o velikosti 8 podle normy ČSN ISO 702-1. Ke hřídeli vřetene je dále zpracován výrobní výkres dostupný v příloze diplomové práce.

Mazání ložisek je zvoleno plastickým mazivem. Vzhledem k relativně malým otáčkám vřetene je tento typ mazání dostatečný. Výhodou plastického maziva ve srovnání s mazáním olejem je jednodušší konstrukce vřetene. Při vertikální orientaci vřetene se plastické mazivo lépe udrží v prostoru ložisek. Plastické mazivo může dále napomáhat k ochraně ložisek před nečistotami a vlhkostí. Pro mazání ložisek je zvoleno plastické mazivo LGHC 2 od výrobce SKF [48].

Velká řemenice je na hřídeli vřetene upevněna pomocí rozpěrného pouzdra PHF FX60-80X120 od výrobce SKF [49]. Řemenice je vyrobena odléváním z šedé litiny. To má za následek úsporu materiálu a snížení hmotnosti. Díky použití rozpěrného pouzdra pro spojení řemenice s vřetenem není třeba vyrábět drážky, které by oslabily hřídel vřetene a způsobovaly by špatné vyvážení vřetene.



Obr. 36) Model rotační soustavy

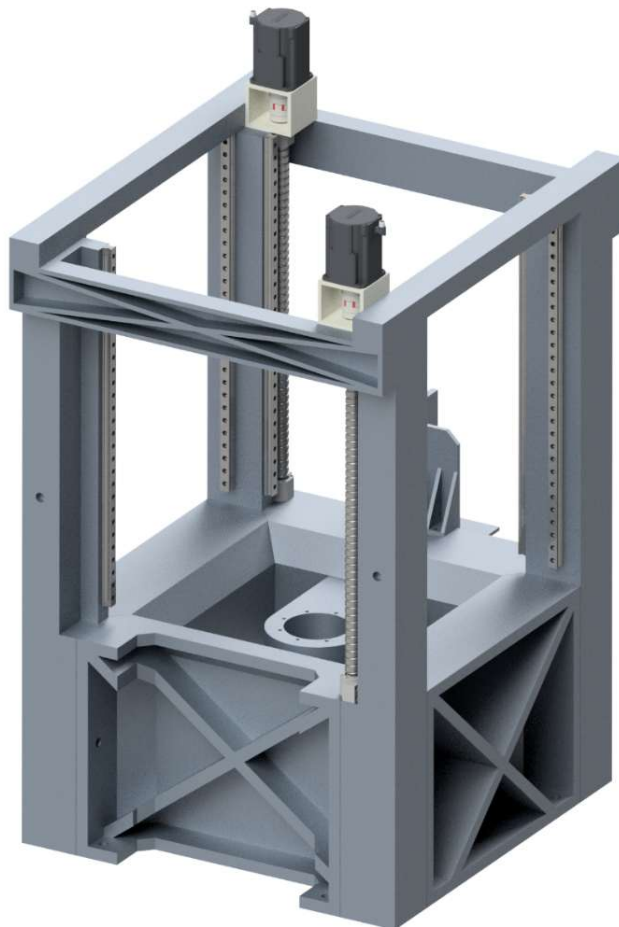
6.3 Nosná soustava

Z návrhové varianty vyplývá, že se nosná soustava skládá z pevného rámu s vřeteníkem, konzoly, příčnicku a suportu. Volba základní stavby, materiálu, topologie a způsobu montáže jednotlivých částí nosné soustavy je zpracována v následujících kapitolách. Nosná soustava je zde navržena pouze obecně, a měla by být chápána jako koncept.

6.3.1 Rám

Pevná nosná soustava, v tomto případě rám stroje slouží pro uložení a vedení ostatních částí stroje. Musí proto být dostatečně tuhý a stabilní. Rám navrženého stroje se skládá ze čtyř stěn a čtyř sloupů. Stěny i sloupy jsou vyrobeny jako svařence z konstrukční oceli (např. S355J2). V horní straně rámu jsou sloupy propojeny čtyřmi profily. Profily jsou opět vyrobeny svařováním. Polotovarem pro výrobu jednotlivých svařenců jsou plechy a tlustostěnné profily. Části rámu jsou navrženy s šikmou topologií žebér. Stykové plochy spojovaných částí rámu jsou broušeny. Spojování jednotlivých částí v celkovou pevnou nosnou soustavu je realizováno šroubovými spoji.

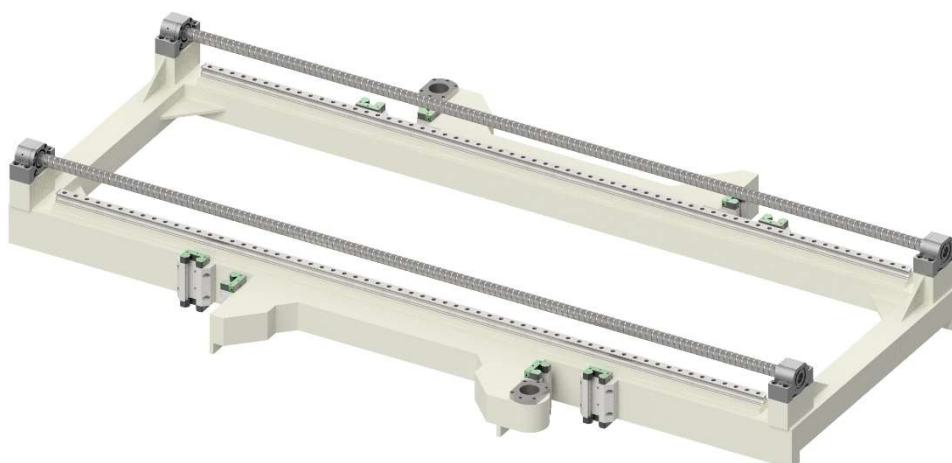
Na zadní stěnu rámu je namontován vřeteník pro uložení vřetene. Na vnitřní strany sloupů jsou montovány kolejnice pro profilové valivé vedení a ložiskové domky pro uložení kuličkových šroubů. Ve stěnách jsou vyrobeny otvory pro kotvení rámu do základu. Stěny a sloupy jsou dále opatřeny vázacími oky pro snadnou a bezpečnou manipulaci celého stroje.



Obr. 37) Model rámu stroje

6.3.2 Konzola

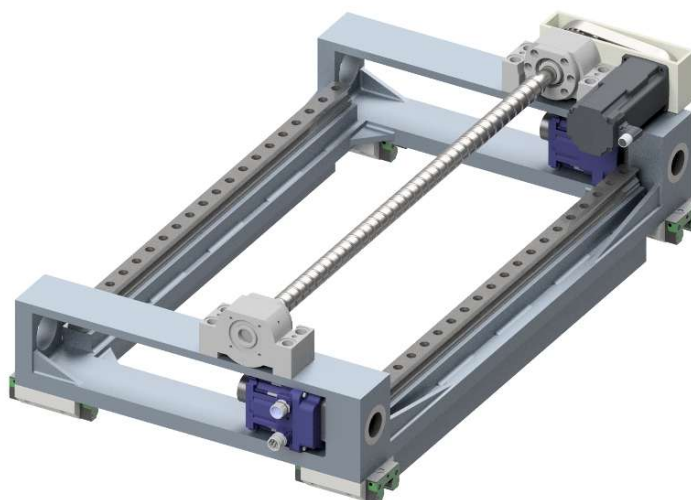
Konzola je vedena v profilových valivých vedeních umístěných na sloupech rámu. Pohybuje se v ose Z. Je poháněna dvěma kuličkovými šrouby umístěnými diagonálně. Na horní straně konzoly je umístěno profilové valivé vedení a kuličkové šrouby pro vedení a pohon příčnicku. Konzola je vyrobena svařováním z ocelových profilů. Stykové plochy pro kolejnice valivého vedení jsou opět broušeny. Vzhledem k tomu, že je při funkci stroje posouvána celou konzolou, měla by její hmotnost být co nejmenší při zachování dostatečné tuhosti. Pro výpočet kuličkových šroubů a motorů pro jejich pohon je uvažována hmotnost konzoly $m_k = 800 \text{ kg}$.



Obr. 38) Model konzoly

6.3.3 Příčnick

Příčnick je veden po konzole v ose X a poháněn dvěma kuličkovými šrouby. Na horní straně příčnicku je opět umístěno profilové valivé vedení a kuličkový šroub pro ovládání pohybu suportu. Příčnick má svařovanou konstrukci z ocelových profilů a broušené stykové plochy. Pro provedení potřebných výpočtů je zvolena hmotnost příčnicku $m_p = 150 \text{ kg}$.



Obr. 39) Model příčnicku

6.3.4 Suport

Suport je veden po příčnici v ose Y a je poháněn kuličkovým šroubem s maticí. Suport je navržen s upínacím rozhraním pro upínání nástrojových hlav a adaptérů. Upínací rozhraní se koncepčně skládá ze čtyř bodů pro automatickou výměnu a Hirthova věnce pro zpevnění spojení. V suportu je zabudován servomotor pro náhon rotačních nástrojů. Aditivní hlava je pevně upnuta na straně suportu. Hmotnost suportu i s nástrojovou a aditivní hlavou je zvolena $m_s = 50 \text{ kg}$.



Obr. 40) Model suportu

6.4 Lineární posuvové soustavy

Pro pohon lineárních soustav navrhovaného stroje jsou použity kuličkové šrouby a matice (KŠM). Návrh KŠM je řešen pro jednotlivé části pohybové nosné soustavy, včetně návrhu motoru. Pro řešení vedení lineárních posuvových soustav je zvoleno valivé profilové vedení. Pro výpočty je uvažována hodnota tření ve vedení $f_{vv} = 0,001$. Součástí lineární posuvových soustav je odměřování polohy. Je zvolen absolutní enkodér LC 100 od výrobce HEIDENHAIN [47].



Obr. 41) Lineární enkodér HEIDENHAIN LC 100 [47]

6.4.1 Lineární posuvová soustava suportu

Pro pohon osy Y, tedy pohon pohybu suportu po příčnicku je zvolen kuličkový šroub o průměru $d_{s1} = 32 \text{ mm}$, stoupání $s_{s1} = 10 \text{ mm}$, délce (vzdálenosti mezi ložisky) $l_{s1} = 820 \text{ mm}$, a dynamické únosnosti $C_{s1} = 31500 \text{ N}$ [50]. Uložení šroubu na straně motoru je zvoleno vetknuté, na druhé straně je šroub podepřen.

Prvním krokem je zjištění trvanlivosti kuličkového šroubu. Je uvažováno maximální možné zatížení, které vznikne při tangenciálním najetí nástrojem do řezu. V tomto případě vzniká síla, která je rovna součtu tečné složky maximální řezné síly F_{cmax} a síly od tření ve vedení. Hodnota nejvyšších provozních otáček je určena ze zvoleného rychloposuvu $v_s = 30 \text{ m/min}$.

$$F_{s1} = F_{cmax} + m_s \cdot g \cdot f_{vv} = 2488,98 + 50 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = 2489,4705 \text{ N} \quad (63)$$

$$n_{s1} = \frac{v_s}{s_{s1}} = \frac{30}{0,01} = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (64)$$

$$L_{10hs1} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{s1}} \cdot \left(\frac{C_{s1}}{F_{s1}}\right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot 3000} \cdot \left(\frac{31500}{2489,4705}\right)^3 = 11261,4661 \text{ hod} \quad (65)$$

Vypočtena trvanlivost odpovídá přibližně 470 dnům, což by nebylo dostatečné. Je ovšem nutné si uvědomit, že trvanlivost je počítána pro nepřetržitý provoz při maximálním zatížení a maximálních otáčkách. V reálném provozu bude kombinace otáček a zatížení vždy menší, a provoz nebude nepřetržitý. Z hlediska trvanlivosti tedy zvolený šroub vyhovuje.

Dále je nutné zjistit kritické otáčky a kritickou vzpěrnou sílu zvoleného kuličkového šroubu. K tomu je potřeba znát otáčkový součinitel $f_n = 15$, a vzpěrný součinitel $f_v = 0,5$. [1]

$$n_{krs1} = \frac{10^7 \cdot f_n \cdot d_{s1}}{l_{s1}^2} = \frac{10^7 \cdot 15 \cdot 32}{820^2} = 7138,608 \text{ min}^{-1} \quad (66)$$

$$n_{maxs1} = n_{krs1} \cdot 0,8 = 7138,608 \cdot 0,8 = 5710,8864 \text{ min}^{-1} \quad (67)$$

Maximální dovolené otáčky jsou poté vypočítány jako 80 % kritických otáček. Zvolený šroub vyhovuje z hlediska kritických otáček.

$$F_{krs1} = \frac{500 \cdot \pi^3 \cdot d_{s1}^4}{l_{s1}^2 \cdot f_v} = \frac{500 \cdot \pi^3 \cdot 32^4}{820^2 \cdot 0,5} = 48352,8221 \text{ N} \quad (68)$$

$$F_{maxs1} = \frac{F_{krs1}}{k_{vz}} = \frac{48352,8221}{3} = 16117,6074 \text{ N} \quad (69)$$

Maximální dovolená vzpěrná síla je poté vypočítána s bezpečnostním koeficientem $k_{vz} = 3$. Zvolený šroub vyhovuje z hlediska kritické vzpěrné síly.

Náhon kuličkového šroubu je řešen přes synchronní řemenový převod z důvodu úspory zástavbového prostoru. Pro volbu motoru je uvažován převodový poměr $i_{rs} = 1$ a účinnost převodu $\eta_r = 0,98$ [42]. Zatížení motoru je opět uvažováno maximální možné při tangenciálním najetí nástrojem do řezu. Účinnost šroubu je uvažována $\eta_s = 0,98$. Účinnost uložení šroubu je uvažována $\eta_{ld} = 0,98$.

$$M_{s1} = \frac{F_{cmax} \cdot s_{s1}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_r \cdot i_{rs} \cdot \eta_s \cdot \eta_{ld}} + \frac{m_s \cdot g \cdot f_{vv} \cdot s_{s1}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_r \cdot i_{rs} \cdot \eta_s \cdot \eta_{ld}} \quad (70)$$

$$M_{s1} = \frac{2488,98 \cdot 0,01}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 0,98} + \frac{50 \cdot 9,81 \cdot 0,001 \cdot 0,01}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 0,98} = 4,2097 \text{ Nm}$$

Na základě vypočteného statického momentu je zvolen motor SIEMENS SIMOTICS S-1FK2105-4AF11-0SA0. Parametry motoru jsou zobrazeny v tabulce 17. [38]

Tab 17) Parametry motoru SIEMENS SIMOTICS S-1FK2105-4AF11-0SA0 [38]

Parametr	Hodnota
Nominální výkon	1,45 kW
Statický moment	5 Nm
Maximální moment	15 Nm
Jmenovité otáčky	3000 min ⁻¹
Maximální otáčky	6000 min ⁻¹
Držný moment brzdy	8 Nm

6.4.2 Lineární posuvová soustava příčnicku

Pro pohon osy X, tedy pohon pohybu příčnicku po konzole je opět zvolen kuličkový šroub o průměru $d_{s2} = 32 \text{ mm}$, stoupání $s_{s2} = 10 \text{ mm}$, délce (vzdálenosti mezi ložisky) $l_{s2} = 2640 \text{ mm}$, a dynamické únosnosti $C_{s2} = 31500 \text{ N}$ [50]. Uložení šroubu je zvoleno stejně jako u suportu, tedy jeden konec vetknut a druhý podepřen.

Prvním krokem je opět zjištění trvanlivosti kuličkového šroubu. Je uvažováno maximální možné zatížení. Díky třem pohybovým osám v nástroji je maximálním zatížením tangenciální najetí nástroje do řezu. Vzniká síla podobně jako u suportu, která je rovna součtu tečné složky maximální řezné síly F_{cmax} a síly od tření ve vedení. Rychloposuv je opět zvolen $v_s = 30 \text{ m/min}$. Příčnick je poháněn dvěma šrouby. Zatížení jednoho šroubu je tedy poloviční.

$$F_{s2} = \frac{F_{cmax} + (m_p + m_s) \cdot g \cdot f_{vv}}{2} \quad (71)$$

$$F_{s2} = \frac{2488,98 + (150 + 50) \cdot 9,81 \cdot 0,001}{2} = 1245,471 \text{ N}$$

$$n_{s2} = \frac{v_s}{s_{s2}} = \frac{30}{0,01} = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (72)$$

$$L_{10hs2} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{s2}} \cdot \left(\frac{C_{s2}}{F_{s2}}\right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot 3000} \cdot \left(\frac{31500}{1245,471}\right)^3 = 89879,0135 \text{ hod} \quad (73)$$

Vypočtena trvanlivost odpovídá přibližně 3700 dnům, což je dostatečné. Z hlediska trvanlivosti tedy zvolený šroub vyhovuje. Je nutné poznamenat, že vypočtená trvanlivost je řešena pro kombinaci maximálního zatížení a maximálních otáček. V reálném provozu bude tedy trvanlivost vyšší.

Dále jsou zjišťovány kritické otáčky a kritická vzpěrná síla zvoleného kuličkového šroubu. K tomu je potřeba znát otáčkový součinitel $f_n = 15$ a vzpěrný součinitel $f_v = 0,5$. [1]

$$n_{krs2} = \frac{10^7 \cdot f_n \cdot d_{s1}}{l_{s2}^2} = \frac{10^7 \cdot 15 \cdot 32}{2340^2} = 688,7052 \text{ min}^{-1} \quad (74)$$

$$n_{maxs1} = n_{krs1} \cdot 0,8 = 688,7052 \cdot 0,8 = 550,9642 \text{ min}^{-1} \quad (75)$$

Maximální dovolené otáčky jsou poté vypočítány jako 80 % kritických otáček. Zvolený šroub nevyhovuje z hlediska kritických otáček. Je tedy nutné zvolit větší šroub, nebo použít šroub statický a pohánět matici. Z důvodu úspory hmotnosti je zvoleno řešení pomocí poháněné matice.

$$F_{krs2} = \frac{500 \cdot \pi^3 \cdot d_{s2}^4}{l_{s2}^2 \cdot f_v} = \frac{500 \cdot \pi^3 \cdot 32^4}{2640^2 \cdot 0,5} = 4664,8929 \text{ N} \quad (76)$$

$$F_{maxs2} = \frac{F_{krs2}}{k_{vz}} = \frac{4664,8929}{3} = 1554,9643 \text{ N} \quad (77)$$

Maximální dovolená vzpěrná síla je poté vypočítána s bezpečnostním koeficientem $k_{vz} = 3$. Zvolené šrouby vyhovují z hlediska kritické vzpěrné síly.

Náhon matice KŠM je řešen přes servomotor s dutou hřídelí. Zatížení motoru je opět uvažováno maximální možné při tangenciálním najetí nástrojem do řezu. Účinnost KŠM je uvažována $\eta_s = 0,98$. Účinnost uložení šroubu je uvažována $\eta_{ld} = 0,98$. Z důvodu použití dvou motorů (master-slave) je statický moment vynásoben konstantou 0,65.

$$M_{s2} = 0,65 \cdot \left(\frac{F_{cmax} \cdot s_{s2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot \eta_{ld}} + \frac{(m_p + m_s) \cdot g \cdot f_{vv} \cdot s_{s2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot \eta_{ld}} \right) \quad (78)$$

$$M_{s2} = 0,65 \cdot \left(\frac{2488,98 \cdot 0,01}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 0,98} + \frac{(150 + 50) \cdot 9,81 \cdot 0,001 \cdot 0,01}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 0,98} \right)$$

$$M_{s2} = 2,6831 \text{ Nm}$$

Na základě vypočteného statického momentu a potřeby duté hřídele je zvolen motor HSM09N-Ma-EC-Ax-A-A30-AAA od výrobce HDD. Parametry motoru jsou zobrazeny v tabulce 18. [40]

Tab 18) Parametry motoru HDD HSM09N-Ma-EC-Ax-A-A30-AAA [40]

Parametr	Hodnota
Statický moment	5,2 Nm
Jmenovité otáčky	3000 min ⁻¹

6.4.3 Lineární posuvová soustava konzoly

Pro pohon osy Z tedy pohon pohybu konzoly po rámu stroje je zvolen kuličkový šroub o průměru $d_{s3} = 63 \text{ mm}$, stoupání $s_{s3} = 20 \text{ mm}$, délce (vzdálenosti mezi ložisky) $l_{s3} = 1500 \text{ mm}$, a dynamické únosnosti $C_{s3} = 115360 \text{ N}$ [50]. Pro uložení šroubu je opět použita kombinace vetknutí a podepření.

Prvním krokem je zjištění trvanlivosti kuličkového šroubu. Je uvažováno maximální možné zatížení, které vznikne při obrábění směrem nahoru v ose z . V tomto případě vzniká síla, která je rovna součtu posuvové složky maximální řezné síly F_{fmax} a síly od hmotnosti zvedaných částí. Rychlost rychloposuvu je opět $v_s = 30 \text{ m/min}$. Konzolu pohání dva šrouby umístěné diagonálně v rozích, výsledné zatížení je tedy vyděleno dvěma.

$$F_{s3} = \frac{1}{2} \cdot [F_{fmax} + (m_s + m_p + m_k) \cdot g] \quad (79)$$

$$F_{s3} = \frac{1}{2} \cdot [1244,49 + (50 + 150 + 800) \cdot g] = 5527,245 \text{ N}$$

$$n_{s3} = \frac{v_s}{s_{s3}} = \frac{30}{0,02} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (80)$$

$$L_{10hs3} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{s3}} \cdot \left(\frac{C_{s3}}{F_{s3}}\right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot 1500} \cdot \left(\frac{115360}{5527,245}\right)^3 = 101018 \text{ hod} \quad (81)$$

Vypočtena trvanlivost odpovídá přibližně 4200 dnům. Z hlediska trvanlivosti tedy zvolené šrouby vyhovují. Opět je nutné poznamenat, že vypočtená trvanlivost je řešena pro kombinaci maximálního zatížení a maximálních otáček. V reálném provozu bude tedy trvanlivost vyšší.

Dále je nutné zjistit kritické otáčky a kritickou vzpěrnou sílu zvoleného kuličkového šroubu. K tomu je potřeba znát otáčkový součinitel $f_n = 15$, a vzpěrný součinitel $f_v = 0,5$. [1]

$$n_{krs3} = \frac{10^7 \cdot f_n \cdot d_{s3}}{l_{s3}^2} = \frac{10^7 \cdot 15 \cdot 63}{1500^2} = 4200 \text{ min}^{-1} \quad (82)$$

$$n_{maxs3} = n_{krs3} \cdot 0,8 = 4200 \cdot 0,8 = 3360 \text{ min}^{-1} \quad (83)$$

Maximální dovolené otáčky jsou poté vypočítány jako 80 % kritických otáček. Zvolené šrouby vyhovují z hlediska kritických otáček.

$$F_{krs3} = \frac{500 \cdot \pi^3 \cdot d_{s3}^4}{l_{s3}^2 \cdot f_v} = \frac{500 \cdot \pi^3 \cdot 63^4}{1500^2 \cdot 0,5} = 217084,7 \text{ N} \quad (84)$$

$$F_{maxs3} = \frac{F_{krs3}}{k_{vz}} = \frac{217084,7}{3} = 72361,5803 \text{ N} \quad (85)$$

Maximální dovolená vzpěrná síla je poté vypočítána s bezpečnostním koeficientem $k_{vz} = 3$. Zvolené šrouby vyhovují z hlediska kritické vzpěrné síly.

Náhon kuličkového šroubu je řešen přímo přes spojku. Zatížení motoru je uvažováno maximální možné při posuvu konzoly nahoru v ose z . Účinnost šroubu je uvažována $\eta_s = 0,98$. Účinnost uložení šroubu je uvažována $\eta_{ld} = 0,98$. Z důvodu použití dvou motorů (Master-Slave) je statický moment vynásoben konstantou 0,65.

$$M_{s3} = 0,65 \cdot \left(\frac{F_{fmax} \cdot s_{s3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot \eta_{td}} + \frac{(m_k + m_p + m_s) \cdot g \cdot s_{s3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot \eta_{td}} \right)$$

$$M_{s3} = 0,65 \cdot \left(\frac{1244,49 \cdot 0,02}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 0,98} + \frac{(800 + 150 + 50) \cdot 9,81 \cdot 0,02}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 0,98} \right) \quad (86)$$

$$M_{s3} = 23,815 \text{ Nm}$$

Na základě vypočteného statického momentu je zvolen motor SIEMENS SIMOTICS S-1FT2210-3AB21-0SA0. Parametry motoru jsou zobrazeny v tabulce 19. [39]

Tab 19) Parametry motoru SIEMENS SIMOTICS S-1FT2210-3AB21-0SA0 [39]

Parametr	Hodnota
Nominální výkon	4,5 kW
Statický moment	30 Nm
Maximální moment	90 Nm
Jmenovité otáčky	1500 min ⁻¹
Maximální otáčky	2500 min ⁻¹
Držný moment brzdy	55 Nm

6.5 Řízení pohybů stroje

K řízení navrženého CNC stroje je použit řídicí systém SINUMERIK 840D sl [52] od společnosti SIEMENS. SINUMERIK 840D sl plně podporuje interpolace osy C, a synchronizaci vřetene a externího odměřování. Řídicí systém je propojen s pohonným systémem SINAMICS S120 [53]. Ten je poté propojen se servomotory řady SIMOTICS S-1FK2 [38], SIMOTICS S-1FT2 [39] a motorem vřetene SIMOTICS M 1PH8 [37]. Systém využívá rozhraní Drive-CLiQ pro komunikaci mezi řízením a pohony. Servomotor s dutou hřídelí HDD [41] je propojen s měničem přes převodník HEIDENHAIN EIB 2391S [51]. Tento převodník převádí komunikaci z EnDat 2 na Drive-CLiQ. Je tedy vhodné ho použít i pro propojení úhlového enkodéru HEIDENHAIN ECA 4000 [46] a lineárních enkodérů HEIDENHAIN LC 100 [47] s řídicím systémem.

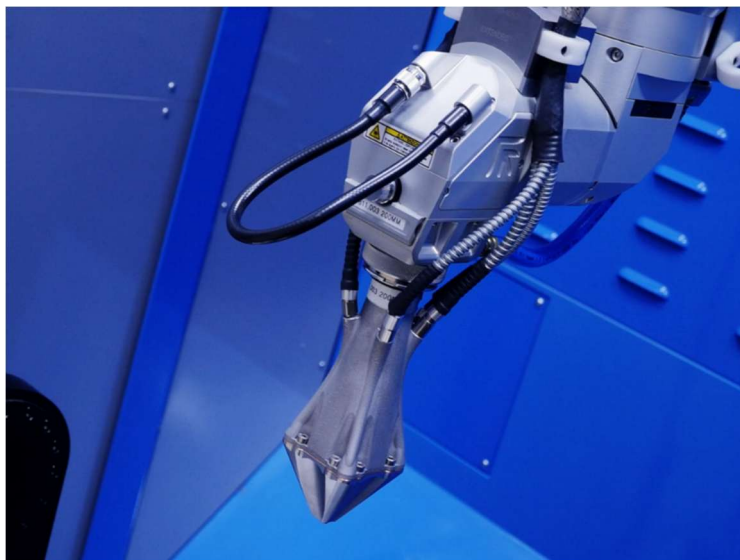


Obr. 42) SINAMICS S120 drive systém [53]

6.6 Aditivní jednotka

Hlavními částmi aditivní jednotky jsou aditivní hlava s nanášecí tryskou, zásobník přídavného materiálu a zdroj energie. Jak již bylo zmíněno v kapitole nosné soustavy, aditivní hlava je pevně spojena se suportem. Ve vytvořeném modelu je aditivní hlava pouze reprezentací základního tvaru a rozměrů. Reálná konstrukce hlavy, její spojení se suportem a vedení potřebných médií závisí na konkrétní aditivní jednotce. Detailní řešení aditivní jednotky a její integrace do výrobního stroje není předmětem této práce. Jedná se tedy pouze o obecnou volbu vhodné aditivní jednotky.

Byla zvolena soustava aditivní jednotky DED kit od společnosti Prima Additive. Tato jednotka využívá aditivní technologii přímého nanášení materiálu (DED) se zdrojem energie v podobě laseru a práškem jako přídavným materiálem. DED kit se skládá z aditivní hlavy REAL DED head, zdroje laseru a dopravníku prášku. Laserová hlava umožňuje její integraci do robotických systémů a výrobních strojů. Součástí hlavy je vodní chlazení a monitorování tavné lázně pomocí kamerového systému. Hmotnost aditivní hlavy je 8 kg. Zdroj laseru je modulární o výkonech 1 až 6 kW. Dopravník prášku má až čtyři zásobníky, každý o objemu 5,5 litru. Aditivní jednotka umožňuje nanášení materiálů jako jsou oceli a jejich slitiny, dále měď, titan, kobalt, nikl a jejich slitiny. [56]



Obr. 43) Laserová hlava REAL DED head použita ve stroji LASERDYNE® 811 [57]

6.7 Obráběcí jednotka

Pro zajištění flexibility navrženého stroje jsou obráběcí jednotky výměnné v suportu stroje. Obecně se obráběcí jednotka skládá z nástrojového bloku, držáku nástroje a monolitického nástroje nebo břitové destičky. Jsou to právě různé nástrojové bloky, které zajišťují vysokou výrobní flexibilitu stroje. Umožňují použití pevných i rotačních nástrojů, orientovaných rovnoběžně s osou rotace i kolmo na ni. Nástrojové bloky a upínací jednotky nejsou standardní, a jejich konstrukce závisí na konkrétních potřebách výroby. Upínací rozhraní suportu a nástrojového bloku je navrženo tak, aby umožňovalo jejich automatickou výměnu. Konstrukční řešení obráběcí jednotky a rozhraní stroj – nástrojový blok není předmětem této práce. Pro upínání samotných nástrojů je zvoleno rozhraní Coromant Capto® [58], z důvodu možnosti automatického upínání jak pevných, tak i rotačních nástrojů.

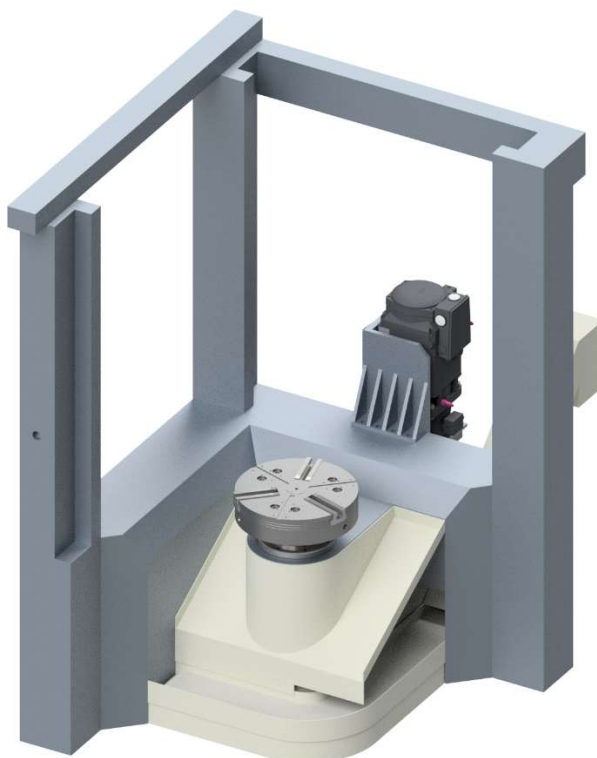


Obr. 44) Nástrojové bloky vertikálního soustruhu [59]

6.8 Krytování

6.8.1 Vnitřní krytování pevné

Vnitřní kryty slouží k odvodu třísek z pracovního prostoru stroje. Dále chrání rotační soustavu před odpadem obrábění a aditivní výroby. Vnitřní kryty jsou vyrobeny z plechů z uhlíkové oceli. Povrchově jsou poté upraveny zinkováním k zajištění vyšší odolnosti proti korozi.



Obr. 45) Model vnitřního pevného krytování

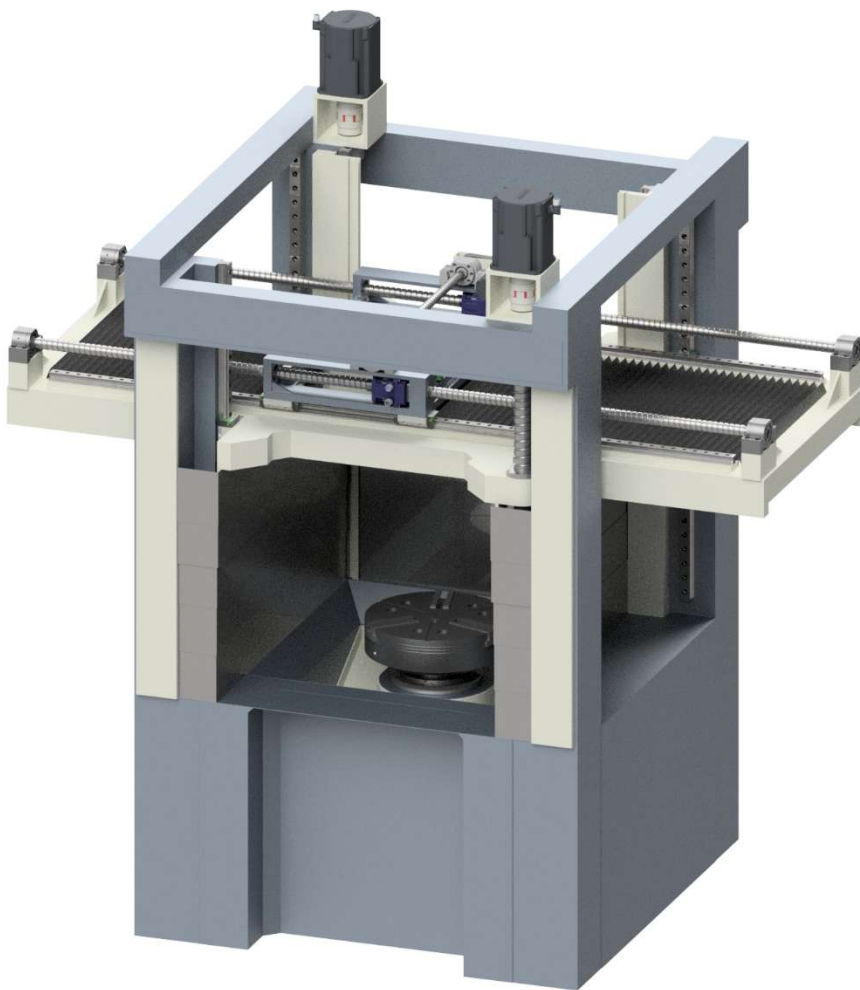
6.8.2 Vnitřní krytování pohyblivé

Zadní a boční stěny pracovního prostoru navrženého stroje jsou krytovány pomocí teleskopických krytů. Tyto kryty chrání kuličkové šrouby a profilové valivé vedení konzoly. Boční kryty jsou navrženy tak, aby umožňovaly otevření a uzavření pracovního prostoru stroje. Mají dva stavy, tedy aktivní a pasivní. V pasivním stavu jsou boční kryty pevně spojeny s konzolou a pohybují se s ní. Pracovní prostor je tedy uzavřen. V aktivním stavu se boční kryty odpojí od konzoly a pomocí pohonu sjedou na svou minimální pozici, tím dojde k otevření pracovního prostoru. Takto navržené kryty umožňují vyjetí příčnicku z pracovního prostoru stroje a provedení výměny nástroje, či obrobku.

Konzola je zakrytována pomocí elastických měchů. Měchy jsou zde zvoleny z důvodu nízké hmotnosti a malého vlivu třísek a chladicí kapaliny v této poloze.

6.8.3 Vnější krytování

Kapotáž stroje není v této práci detailně zpracována. Stroj je zakrytován z důvodu bezpečnosti, tak, aby nebyly odkryty ostré hrany, a aby obsluha neměla volný přístup k pohyblivým částem stroje. Z důvodu integrace aditivní technologie s laserem je nutné použít vhodný materiál pro průhledné kryty stroje tak, aby nedošlo k újmě na zdraví obsluhy.



Obr. 46) Model krytování stroje

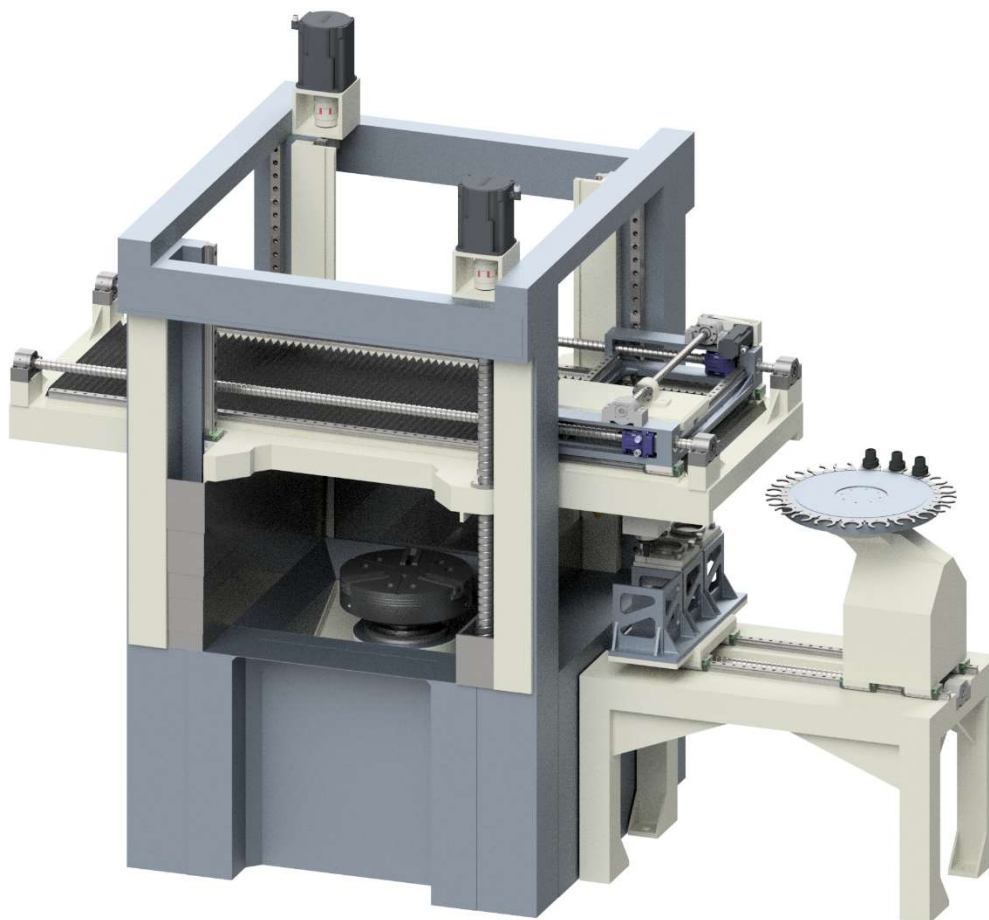
6.9 Odvod třísek

Model navrženého dopravníku je částečně vidět na obrázku 45. Vývod dopravníku třísek je vhodné umístit do zadní části stroje. Sklon vnitřních krytů je orientován k přední části. Je tedy nutné vést třísky po lomené dráze (při pohledu shora). Nabízejí se dvě řešení. Prvním řešením je použití speciálního dopravníku s pravoúhloú dráhou. Druhým řešením je použít dva na sebe navazující dopravníky s přímou dráhou.

6.10 Automatická výměna nástrojů

Automatická výměna nástrojů probíhá metodou pick-up. Na pravé straně stroje jsou umístěny dva skladovací zásobníky, jeden pro nástrojové bloky a adaptéry a druhý pro samotné nástroje v upínačích. Zásobník nástrojových bloků může být dle požadované kapacity navržen jako přímý nebo rotační. Druhý zásobník pro nástroje v držácích může být opět dle požadované kapacity řešen jako diskový nebo řetězový.

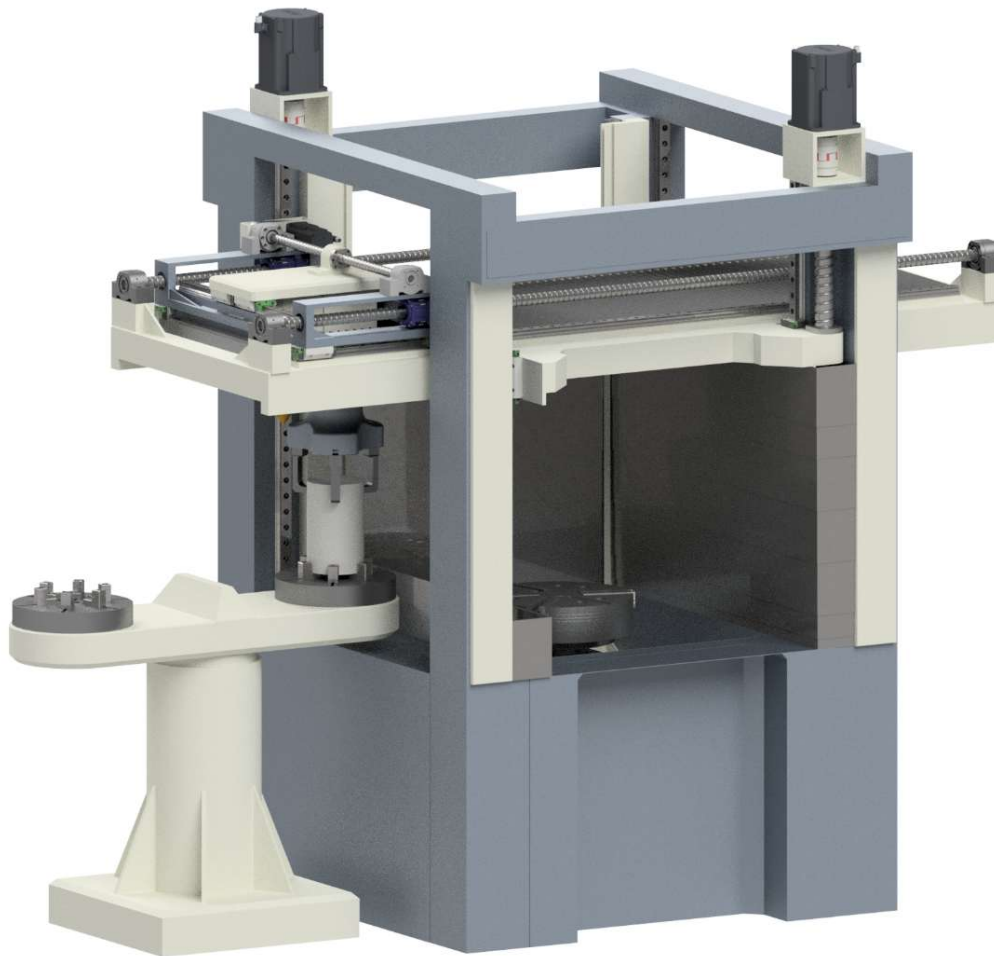
Samotná výměna probíhá najetím příčnicku se suportem na koncovou pozici na konzole a následným najetím konzoly na pozici zásobníku adaptérů. Dále následuje odebrání (výměna) potřebného adaptéru (nástrojového bloku) a najetí na pozici zásobníku nástrojů a odebrání nástroje. Po výměně potřebného nástroje se příčník se suportem vrací do pracovního prostoru stroje. Aby nedocházelo ke kolizím mezi zásobníky a konzolou, jsou oba zásobníky uloženy na profilovém valivém vedení a poháněny kuličkovým šroubem a maticí.



Obr. 47) Model automatické výměny nástrojů

6.11 Automatická výměna obrobků

Automatická výměna obrobků je opět navržena metodou pick-up. Je zde navržena otočná výměnná stanice, v levé části stroje. K umožnění výměny by bylo nutné navrhnout vhodné chapadlo (koncový efektor), které by mělo stejné upínací rozhraní jako mají nástrojové adaptéry. Výměna by probíhala upnutím chapadla do suportu stroje, uchopením hotového výrobku, najetím příčnicku se suportem na pozici výměnné stanice. Dále vložením výrobku do stanice, otočením stanice, uchopením polotovaru a následným přemístěním polotovaru na sklíčidlo rotační jednotky.



Obr. 48) Model automatické výměny obrobků

Vzhledem k aditivnímu charakteru výroby na stroji není předpokládáno, že bude běžně docházet k manipulaci polotovarů o maximálních rozměrech a hmotnosti. Je ovšem potřeba ověřit, zda zvolené kuličkové šrouby a jejich pohon umožní manipulaci s takovýmto polotovarem. Pro výpočet je tedy uvažována stejná hmotnost pohyblivé nosné soustavy jako v kapitole 6.4. Uvažovaná hmotnost polotovaru je poté $m_o = 300 \text{ kg}$ a hmotnost chapadla $m_{ch} = 100 \text{ kg}$.

Prvním krokem je opět výpočet trvanlivosti kuličkového šroubu. Je uvažováno maximální možné zatížení. Rychlost rychloposuvu je opět $v_s = 30 \text{ m/min}$.

$$F_{s4} = \frac{1}{2} \cdot (m_s + m_p + m_k + m_o + m_{ch}) \cdot g \quad (87)$$

$$F_{s4} = \frac{1}{2} \cdot (50 + 150 + 800 + 300 + 100) \cdot 9,81 = 6867 \text{ N}$$

$$n_{s3} = \frac{v_s}{s_{s3}} = \frac{30}{0,02} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (88)$$

$$L_{10hs4} = \frac{10^6}{60 \cdot n_{s3}} \cdot \left(\frac{C_{s3}}{F_{s4}}\right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot 1500} \cdot \left(\frac{115360}{6867}\right)^3 = 52677,1282 \text{ hod} \quad (89)$$

Vypočtená trvanlivost odpovídá přibližně 2200 dnům při maximálních otáčkách a maximálním zatížení. Z hlediska trvanlivosti tedy zvolené šrouby vyhovují. Zvolené šrouby dále vyhovují z hlediska kritické vzpěrné síly dle výpočtů v kapitole 6.4.3.

Zatížení motoru je uvažováno pro zvedání polotovaru vzhůru v ose z. Účinnost šroubu je uvažována $\eta_r = 0,98$. Účinnost uložení šroubu je uvažována $\eta_{ld} = 0,98$. Z důvodu použití dvou motorů (Master-Slave) je statický moment vynásoben konstantou 0,65. Na základě výsledku ve vzorci 90 navržený motor SIEMENS SIMOTICS S-1FT2210-3AB21-0SA0 [39] vyhovuje pro manipulaci polotovarů do hmotnosti 300 kg.

$$M_{s4} = 0,65 \cdot \left(\frac{(m_k + m_p + m_s + m_o + m_{ch}) \cdot g \cdot s_{s3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot \eta_{ld}} \right) \quad (90)$$

$$M_{s4} = 0,65 \cdot \left(\frac{(800 + 150 + 50 + 300 + 100) \cdot 9,81 \cdot 0,02}{2 \cdot \pi \cdot 0,98 \cdot 0,98} \right) = 29,5879 \text{ Nm}$$

6.12 Přídavná zařízení

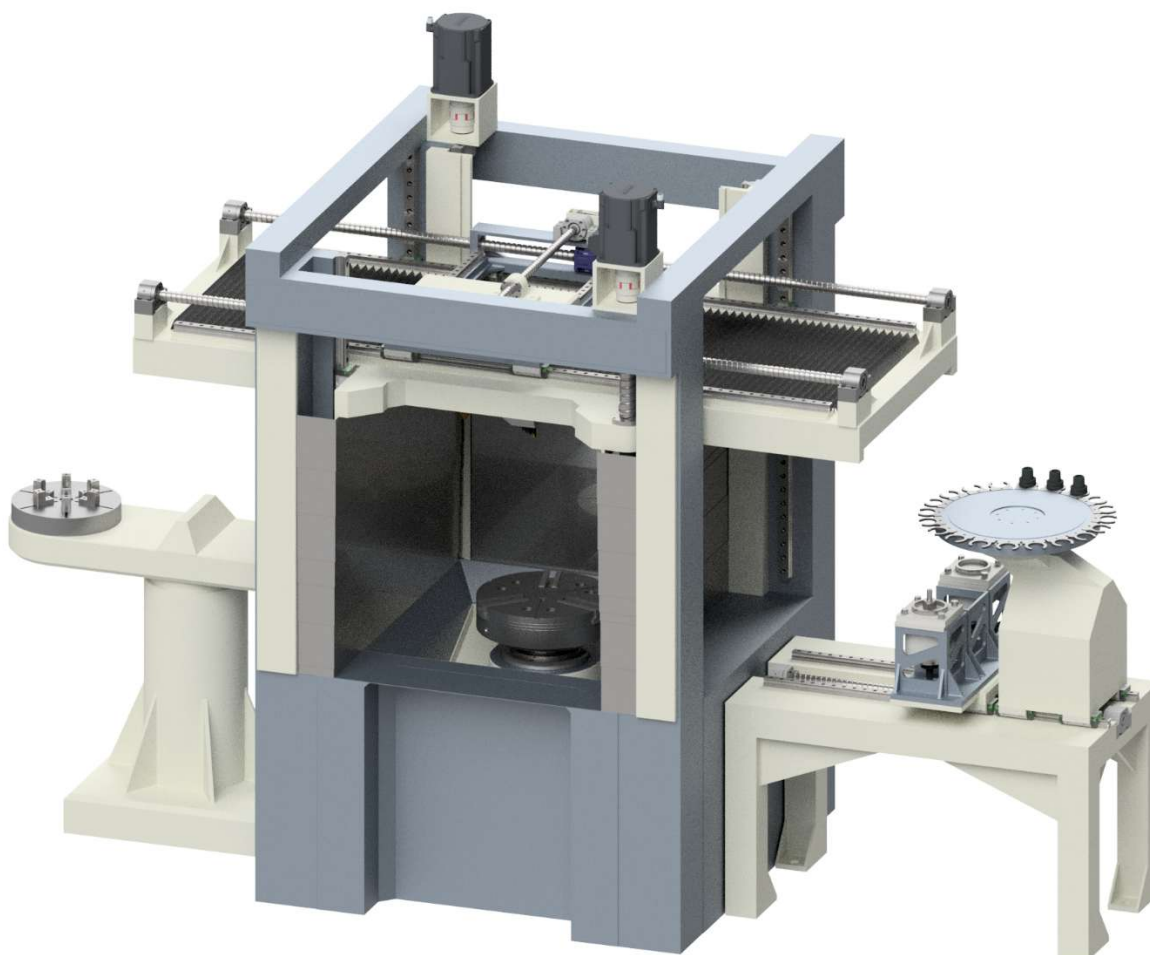
Při aditivní výrobě mohou vznikat výpary, které mohou být nebezpečné pro obsluhu. Malé částice nevyužitého prášku jsou dalším potenciálním nebezpečím. Je tedy nutné zajistit filtraci pracovního prostoru. Jako filtrační zařízení je zvolen systém Downflo® od společnosti Donaldson FILTRATION SOLUTIONS [60]. Tento výrobce nabízí řešení jak pro filtraci prašných částic a výparů při navařování, tak i vlhkosti a výparů chladicí kapaliny vzniklých při obrábění.



Obr. 49) Filtrační systém Donaldson [60]

Pro aditivní technologii DED je také důležitý systém ochranné atmosféry. Ten může být lokální nebo komorový. Pro navržený stroj je zvolen lokální systém. Pro technologie DED se nejčastěji používají plyny, jako je argon, dusík a hélium. Návrh a realizaci systémů ochranné atmosféry pro stroje pracující s aditivními technologiemi nabízí například společnost AIR LIQUIDE [61].

6.13 Celková sestava stroje



Obr. 50) Model stroje

6.14 Technická dokumentace

K navrženému stroji je dále vypracována výkresová dokumentace v programu Autodesk AutoCAD. Výkresová dokumentace je obsažena v příloze, a skládá se z výkresu sestavy stroje, výkresu sestavy vřetene a výrobních výkresů jednotlivých částí vřetene. Součástí přílohy je také 3D model navrženého stroje ve formátu STEP, vytvořený v programu Autodesk Inventor.

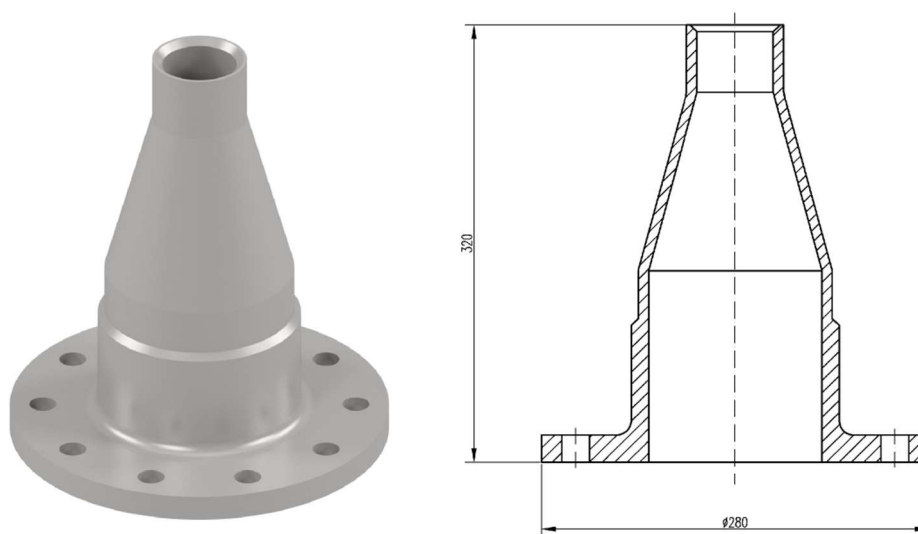
7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Součástí návrhu hybridního CNC obráběcího centra je technicko-ekonomické zhodnocení. Technické hodnocení obsahuje stručný přehled základních vlastností navrženého obráběcího centra, jeho výhody a nevýhody.

Navržený stroj využívá svislou osu rotace obrobku. Konstrukce nosné soustavy a volba kinematiky stroje jsou navrženy tak, aby většina pohyblivých částí byla umístěna mimo dosah třísek a abrazivních částic vznikajících aditivní výrobou. Zvolenou technologií aditivní výroby je metoda přímého nanášení materiálu (DED – Directed Energy Deposition), konkrétně s využitím laseru jako zdroje energie a kovového prášku jako přídavného materiálu. Konstrukce stroje je však flexibilní a umožňuje integraci různých metod DED. Aditivní jednotka s nanášecí tryskou je montována přímo na suport stroje. Tři lineární pohybové osy umožňují pohyb suportu, a tím i nástroje a trysky v souřadnicích X, Y, Z a zajišťují tak flexibilitu výroby.

Rozměry navrženého stroje vycházející z vytvořeného modelu v programu Autodesk Inventor jsou 2550 mm, 2540 mm, 4285 mm (výška, šířka, délka). Rozměry pracovního prostoru jsou 900 mm, 1040 mm, 1340 mm (výška, šířka, délka). Odhadovaná hmotnost stroje je 10 810 kg. Maximální velikost polotovaru, který lze na stroji obrábět, je průměr 400 mm, výška 400 mm, a hmotnost 300 kg. Vřeteno je vybaveno tříčelistovým sklíčovadlem, ovládaným pomocí hydrauliky. Hlavními parametry vřetene jsou maximální otáčky 625 min^{-1} (bez přetížení motoru) a maximální krouticí moment 690 Nm. Dále je stroj doplněn o systém automatické výměny nástrojů a obrobků. Součástí konstrukce je rovněž řešení vnitřního krytování a odvodu třísek.

Ekonomické zhodnocení je zpracováno formou kalkulace kritického počtu kusů. Tato kalkulace porovnává klasické obráběcí centrum s hybridním obráběcím centrem. Výsledkem kalkulace je kritický počet kusů, který je bodem zlomu efektivity porovnávaných obráběcích center. Tato kalkulace je provedena pro výrobu fiktivního obrobku zobrazeného na obrázku 51. Postup a výpočty obsažené v této kapitole vychází z metodiky uvedené v prezentaci k předmětu Stavba výrobních strojů II [62], která sloužila jako výukový podklad.



Obr. 51) Fiktivní obrobek

Pro výpočet strojní hodinové sazby stroje je třeba vypočítat roční časový fond stroje (vzorec 91). Zde je uvažováno 365 dní v roce, 52 víkendů a 8 svátků. Dále je uvažováno 13 dní pro plánované a neplánované opravy. Stroje fungují ve dvou osmihodinových směnách za den. Roční hodinová sazba je uvažována stejná pro oba stroje. Odhad ceny strojů je pro obráběcí centrum 12 miliónů korun, pro hybridní 17 miliónů korun. Procentuální hodnoty odpisů, úroků, údržby, ploch a energií, jsou stejné pro oba případy. Z těchto hodnot je dále vypočítána strojní hodinová sazba stroje (vzorce 92 a 93).

$$R_{fs} = (d_r - d_v - d_s - d_o) \cdot h_d \cdot s_d \quad (91)$$

$$R_{fs} = (365 - 2 \cdot 52 - 8 - 13) \cdot 8 \cdot 2 = 3840 \text{ hod}$$

$$S_{hso} = [(o_s + ur_s + ud_s + p_s + e_s) \cdot c_{so}] / R_{fs} \quad (92)$$

$$S_{hso} = \frac{[(0,2 + 0,09 + 0,05 + 0,05 + 0,1) \cdot 12000000]}{3840} = 1531,25 \text{ Kč/hod}$$

$$S_{hsh} = [(o_s + ur_s + ud_s + p_s + e_s) \cdot c_{sh}] / R_{fs} \quad (93)$$

$$S_{hsh} = \frac{[(0,2 + 0,09 + 0,05 + 0,05 + 0,1) \cdot 18000000]}{3840} = 2296,87 \text{ Kč/hod}$$

Dále je třeba zjistit náklady na obrobení jednice. K tomu je nutné odhadnout čas potřebný na přípravu výroby, a čas potřebný na samotnou výrobu. Čas přípravy t_p je v obou případech stanoven na 12 minut. Čas výroby na obráběcím stroji t_{vo} je odhadnut na 6 hodin hrubování při odebrání přibližně 26 kg za hodinu, a 1 hodinu dokončování. Čas výroby na hybridním obráběcím centru je odhadnut na základě přibližné hmotnosti naneseného materiálu 6,75 kg a produktivity aditivního nanášení 3 kg/hod. Pro dokončovací obrábění na hybridním obráběcím centru je uvažován čas 1 hodina.

$$N_{ajo} = (t_p + t_{vo}) \cdot S_{hso} = (0,2 + 7) \cdot 1531,25 = 11025 \text{ Kč} \quad (94)$$

$$N_{ajh} = (t_p + t_{vh}) \cdot S_{hsh} = (0,2 + 3,25) \cdot 2169,27 = 7924,22 \text{ Kč} \quad (95)$$

Měsíční mzda včetně sociálního a zdravotního pojištění je zvolena 45 000 Kč. Mzda je pro obsluhu obráběcího i hybridního centra je uvažována stejná. Mzda na jednici je vypočítána dle vzorce 96. Zde je uvažováno, že na obráběcím stroji se vyrobí jeden kus za směnu, na hybridním se kusy vyrobí dva.

$$M_{jo} = \frac{45000}{20 \cdot 1} = 2250 \text{ Kč} \quad (96)$$

$$M_{jh} = \frac{45000}{20 \cdot 2} = 1125 \text{ Kč} \quad (97)$$

Cena materiálu pro obráběcí centrum je odhadnuta z ceny polotovaru ocelová tyč kruhového průřezu o průměru 290 mm a délce 330 mm. Materiál tyče je 16MnCr5+A, odhadovaná cena tyče je 23 000 Kč za jeden metr.

$$P_{jo} = 23000 \cdot 0,33 = 7590 \text{ Kč} \quad (98)$$

Polotovarem pro hybridní obráběcí centrum je ocelová tyč a ocelový prášek. Cena ocelová tyče kruhového průřezu o průměru 290 mm a délce 30 mm (příruba obrobku) je opět odhadnuta na 23 000 Kč za jeden metr. Cena ocelového prášku je odhadována na 1600 Kč/kg. Odhadované použité množství prášku je 6,75 kg.

$$P_{jh} = 23000 \cdot 0,03 + 1600 \cdot 6,75 = 11490 \text{ Kč} \quad (99)$$

Přímé náklady na jednici jsou poté součtem nákladů na jednicový materiál, jednicovou mzdu a nákladů na obrobek jednice.

$$N_{jo} = P_{jo} + M_{jo} + N_{ojo} = 7590 + 2250 + 11025 = 20865 \text{ Kč} \quad (100)$$

$$N_{jh} = P_{jh} + M_{jh} + N_{ojh} = 11490 + 1125 + 7924,22 = 20539,22 \text{ Kč} \quad (101)$$

Vedlejší a režijní náklady na jednici jsou odhadnuty v tabulce 20. Jejich součtem jsou jednorázové náklady na jednici N_{Ro} , N_{Rh} .

Tab 20) Kalkulace ekonomického zhodnocení

Obráběcí centrum		Hybridní obráběcí centrum	
Roční časový fond stroje	3840 hod	Roční časový fond stroje	3840 hod
Cena stroje	12 mil. Kč	Cena stroje	18 mil. Kč
Odpisy	20 %	Odpisy	20 %
Úroky	9 %	Úroky	9 %
Údržba	5 %	Údržba	5 %
Plochy	5 %	Plochy	5 %
Energie	10 %	Energie	10 %
Strojní hodinová sazba stroje	1531,25 Kč/hod	Strojní hodinová sazba stroje	2296,87 Kč/hod
Čas přípravy	0,2 hod	Čas přípravy	0,2 hod
Čas výroby	7 hod	Čas výroby	3,25 hod
Náklady na obrobek jednice	11 025 Kč	Náklady na obrobek jednice	7924,22 Kč
Mzda jednicová	2 250 Kč	Mzda jednicová	1 125 Kč
Materiál jednicový	7 590 Kč	Materiál jednicový	11 490 Kč
Přímé náklady na jednici	20 865 Kč	Přímé náklady na jednici	20 539,22 Kč
Režijní náklady na jednici	1 000 Kč	Režijní náklady na jednici	2 000 Kč
Vedlejší náklady na jednici	3 000 Kč	Vedlejší náklady na jednici	10 000 Kč
Jednorázové náklady na jednici	4 000 Kč	Jednorázové náklady na jednici	12 000 Kč

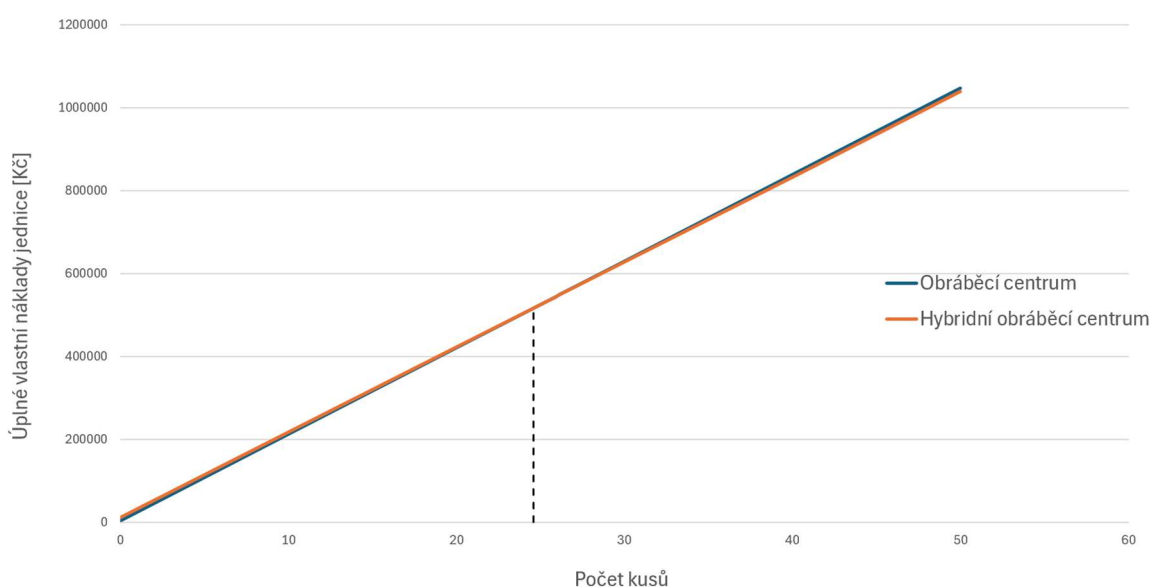
Z vypočtených nákladů je dále vypočítán kritický počet kusů (rovnice 102) a úplné vlastní náklady jednice rovnice (103, 104). Kritický počet kusů je bod zlomu, při jehož překročení se ekonomicky vyplatí hybridní obráběcí centrum. Průběh závislosti úplných vlastních nákladů na počtu vyráběných kusů je zobrazen na obrázku 52. Z výpočtů a grafu vyplývá, že při výrobě 25 a více kusů se ekonomicky vyplatí hybridní CNC obráběcí centrum.

$$p_{kkr} = (N_{Rh} - N_{Ro}) / (N_{jo} - N_{jh}) \quad (102)$$

$$p_{kkr} = (12000 - 4000) / (20865 - 20539,22) = 24,556$$

$$N_{cso} = N_{Ro} + p_k \cdot N_{jo} \quad (103)$$

$$N_{csh} = N_{Rh} + p_k \cdot N_{jh} \quad (104)$$



Obr. 52) Graf kalkulace ekonomického hodnocení

8 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ ROZVOJ

Tato diplomová práce obsahuje návrh konstrukce hybridního CNC obráběcího centra pro rotační obrobky. Detailně je zde zpracován návrh rotační jednotky, tedy vřetene a jeho pohonu. Dále jsou v této práci vypracovány základní výpočty pro návrh kuličkových šroubů a jejich pohonů. Některé z hlavních částí stroje jsou zde navrženy pouze obecně. Kompletní návrh obráběcího stroje, s řešením všech potřebných problematik je nad rámec této práce. Navržené obráběcí centrum je svou stavbou unikátní, a nabízí tak několik možností pro návrh dalších řešení.

Navazující řešení, která by přímo souvisela s touto prací by se mohla zabývat detailním návrhem nosné soustavy včetně návrhu a uložení lineárních posuvových soustav. Dále by se mohlo jednat o konstrukční řešení obráběcí jednotky (suportu) s automatickou výměnou nástrojových bloků. Přínosná by byla také práce zabývající se řešením integrace aditivní jednotky do obráběcího stroje. Dále by bylo možné provést detailní návrh řízení stroje včetně prvků automatizace a virtuálního zprovoznění. V neposlední řadě by bylo možné vypracovat návrh bezpečnostních prvků, posouzení možných rizik, a návrh bezpečnostních opatření stroje.

Mezi řešení, která by mohla být zpracována i bez návaznosti na tuto diplomovou práci patří například návrh lomeného dopravníku (doprava třísek po dráze „L“), a návrh „aktivních“ teleskopických krytů. Dále také systémy automatické výměny nástrojů a obrobků pro metodu pick-up.

9 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout inovativní řešení hybridního CNC obráběcího centra určeného pro výrobu rotačních obrobků, které by kombinovalo konvenční třískové obrábění s aditivní technologií nanášení kovových materiálů.

V úvodu práce byl proveden přehled současného stavu poznání. Zde byly rozebrány obráběcí stroje pro rotační obrobky, jejich stavba a hlavní části. Dále zde byly představeny nekonvenční výrobní technologie, které jsou vhodné pro aditivní nanášení kovů, jejich základní části, vlastnosti a princip jejich funkce. V závěru této části byl zpracován přehled dostupných hybridních obráběcích center, ze kterého je patrná jejich koncepce a integrace aditivní jednotky. Dostupná hybridní obráběcí centra jsou koncipována jako multifunkční, nebo frézovací stroje. návrh soustružnického hybridního obráběcího centra je tedy inovativní, a mohl by vyplňovat mezeru na trhu.

Následně byl zpracován systémový rozbor řešené problematiky, který sloužil k upřesnění podstatných částí, vlastností a kritérií pro samotný návrh. Dále byly navrženy tři varianty řešení hybridního obráběcího centra. Navržené varianty se vyznačují svislou osou rotace obrobku a čtyřmi pohybovými osami. Jednotlivé varianty se liší ve způsobu integrace aditivní jednotky. Na základě systémového rozboru a multikriteriální analýzy byla zvolena nejvhodnější varianta pro další řešení.

U zvolené varianty byla konstrukčně zpracována rotační soustava. Zde se jednalo o návrh uložení vřetene a volbu pohonu. Návrh rotační soustavy byl doplněn o potřebné výpočty. Dále byly provedeny základní výpočty pro pohon lineárních pohybových soustav, tedy návrh kuličkových šroubů a matic, a jejich pohonů. Ostatní hlavní částí navrženého obráběcího stroje, jako jsou nosná soustava, krytování, automatická výměna nástrojů atd. byly zvoleny pouze obecně. Konstrukční řešení rotační soustavy stroje je doplněno o výkresovou dokumentaci, která obsahuje výkres sestavy, a výrobní výkresy jednotlivých součástí.

V poslední části práce bylo zpracováno technicko-ekonomické zhodnocení zpracovaného hybridního obráběcího centra. Zde bylo provedeno porovnání klasického obráběcího centra s navrženým hybridním strojem. Porovnání bylo provedeno pomocí kalkulace úplných vlastních nákladů na výrobu fiktivního obrobku. Dále bylo představeno doporučení pro další rozvoj, které obsahuje obecné i specifické problematiky rozšiřující tuto práci.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, J. et al. Stavba a provoz CNC obráběcích strojů [online]. 1. vyd. Brno: Ústav výrobních strojů systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 23. 3. 2023, updated, průběžně aktualizováno [cit. 12.11.2024]. Učebnice Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 1 svazek. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz>. ISBN 978-80-907452-4-7.
- [2] Hybrid Manufacturing: What it is, Benefits, and the Importance of CAD Data. *Dassault Systèmes, Spatial* [online]. 2022, Oct 05, 2022 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://blog.spatial.com/>
- [3] ŘASA, Jaroslav. Hybridní obráběcí stroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2019, 11. 12. 2019 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hybridni-obrabeci-stroje>
- [4] Additive Manufacturing. *Mazak* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/AM/>
- [5] Budoucnost aditivních výrobních procesů. *DMG MORI* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/novinky-media/blog-and-stories/blog/blg21-2-budoucnost-aditivnich-vyrobnich-procesu>
- [6] *DMG MORI* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/>
- [7] CNC soustruhy YCM s lineárním vedením. *VASON* [online]. [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <http://www.vason.cz/cnctc/cnc-soustruhy-ycm-s-linearnim-vedenim>
- [8] *TOS KURIM* [online]. © 1942–2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.tos-kurim.cz/cz/>
- [9] BAHDINE, Mohamed. What is an Industrial Laser and How Does it Work? *Laserax* [online]. 2021, July 23, 2021 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/what-is-industrial-laser-and-how-does-it-work>
- [10] Laser processing - Welding, Cutting and Surfacing. *TWI Ltd* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/lasers>
- [11] What is Laser Cladding Technology? *TWI Ltd* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laser-cladding>
- [12] SMITH, Brett. What is Plasma Technology and What are its Applications? *AZoNano* [online]. Aug 27 2019 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5280>
- [13] AM Production Study. *SBI* [online]. © 2000–2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.sbi.at/en/applications/am/automotive>
- [14] Ariza Galván E, Montealegre Meléndez I, Arévalo Mora C, et al. (2022) Plasma Metal Deposition for Metallic Materials. *Advanced Additive Manufacturing*. IntechOpen. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.101448>.
- [15] M3DP industrial line. *SBI* [online]. © 2000–2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.sbi.at/en/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line>
- [16] Svařování svazkem elektronů. *INFOCUBE S.R.O. Oneindustry* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/svarovani-svazkem-elektronu/>
- [17] Electron Beam Cladding. *Evobeam* [online]. © 2021 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.evobeam.com/en/electron-beam/technology/cladding/>

- [18] What is Arc Welding? - Definition and Process Types. *TWI Ltd* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-arc-welding>
- [19] Stinson H, Ward R, Quinn J, McGarrigle C. Comparison of Properties and Bead Geometry in MIG and CMT Single Layer Samples for WAAM Applications. *Metals*. 2021; 11(10):1530. <https://doi.org/10.3390/met11101530>
- [20] Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). *TWI Ltd* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>
- [21] RoboWAAM. *WAAM3D* [online]. 2020 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.waam3d.com/hardware/robowaam>
- [22] This is how the unique MPA technology works. *HERMLE* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.hermle.de/en/industries-solutions/additive-manufacturing-services/technology/>
- [23] What is Powder Bed Fusion? Process Definition and Advantages. *TWI Ltd* [online]. © 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-powder-bed-fusion>
- [24] Powder Bed Fusion. *AMAM* [online]. 2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.amamweb.org/Processes/PowderBedFusion.aspx>
- [25] Srivastava, M., Rathee, S. Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks. *Prog Addit Manuf* 7, 261–287 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00229-8>
- [26] What's the Difference Between SLS and SLM? *Rapidmade* [online]. 2014, June 30, 2014 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://rapidmade.com/3d-printing/sls-vs-slm/>
- [27] MATSUURA MACHINERY CORPORATION. *LUMEX Series* [online]. ©2019 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.lumex-matsuura.com/english/>
- [28] Directed Energy Deposition. *Dassault Systèmes* [online]. ©2002–2024 [cit. 2024-11-12]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/make/guide/process/directed-energy-deposition>
- [29] Plasma Arc Welding. *TWI Ltd* [online]. © 2025 [cit. 2025-01-21]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/plasma-arc-welding-007>
- [30] JANÍČEK, Přemysl. JIŘÍ MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. Grada, 2013, 592 s. ISBN 9788024741277.
- [31] SAATY, Thomas L. a Luis G. VARGAS. Decision making with the analytic network process: economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks. New York: Springer Science+Business Media, 2006. International series in operations research & management science. ISBN 0-387-33859-4.
- [32] ISO-Turning Inserts. *ISCAR* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=85&mapp=IS&app=282&GFSTYP=M>
- [33] Machining Power. *ISCAR* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mpwr.iscar.com/Turning/MachiningPower/Longitudinal>
- [34] ROTA NCO 500 Z380-SV90°. *SCHUNK* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://schunk.com/cz/cs/technika-upinani-obrobku/sklicidla/silova-soustruznicka-sklicidla-bez-pruchoziho-otvoru/rota-nco/rota-nco-500-z380-sv90-/p/000000000000856050>

- [35] FF-T2 Z380-A8. *SCHUNK* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://schunk.com/cz/cs/technika-upinani-obrobku/prislusenstvi/nahradni-dily/upinani-typu-z-na-kratky-kuzel-iso-702-1/ff-t2-z380-a8/p/000000000000805010>
- [36] OPUS-V 175. *SCHUNK* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://schunk.com/cz/cs/technika-upinani-obrobku/sklididla/upinaci-valce/opus-v/opus-v-175/p/000000000000823325>
- [37] 1PH8133-3FF03-0PA1-Z. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/CZ/Catalog/Product/?mlfb=1PH8133-3FF03-0PA1-Z&SiepCountryCode=CZ>
- [38] 1FK2105-4AF11-0SA0. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/CZ/Catalog/Product/?mlfb=1FK2106-4AF10-0SA0&SiepCountryCode=CZ>
- [39] 1FT2210-3AB21-0SA0. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/CZ/Catalog/Product/?mlfb=1FT2210-3AB21-0SA0&SiepCountryCode=CZ>
- [40] HSM 09N. *HDD* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://hddservo.com/servo-motors/hollow-shaft-servo-motor/hsm-09n/>
- [41] Helical gearbox. *STÖBER* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.stoerber.de/en/solutions/helical-gearbox/>
- [42] Conti® Synchrodrive. *Continental Industry* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.continental-industry.com/en/solutions/power-transmission/industrial-applications/drive-belts/synchronous-belts/products/product-range/conti-synchrodrive>
- [43] NN 3026 KTN9/SP. *SKF* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/us/products/super-precision-bearings/cylindrical-roller-bearings/productid-NN%203026%20KTN9%2FSP>
- [44] BTW 130 CTN9/SP. *SKF* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/us/products/super-precision-bearings/double-direction-acthbb/productid-BTW%20130%20CTN9%2FSP>
- [45] NN 3020 KTN9/SP. *SKF* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/us/products/super-precision-bearings/cylindrical-roller-bearings/productid-NN%203020%20KTN9%2FSP>
- [46] ECA 4000 series. *HEIDENHAIN* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/angle-encoders/modular/eca-4000>
- [47] LC 100 series. *HEIDENHAIN* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/linear-encoders/sealed/lc-100>
- [48] LGHC 2. *SKF* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/lubrication-management/lubricants/high-load-water-resistant-high-temperature>
- [49] Bushings and hubs. *SKF* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/power-transmission/bushings-and-hubs>

- [50] Kuličkové šrouby. *HIWIN* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/valcovane-srouby/53_jednoduchamatice-prirubova-fsc-fsi-dle-din-69051
- [51] EIB 2391S, EIB 3392S and EIB 3391Y series. *HEIDENHAIN* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/signal-converters/adaptation-to-interfaces/eib-2391s-3392-3391y>
- [52] Introduction SINUMERIK 840D sl with SINAMICS S120. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/cz/Catalog/Products/10166193?tree=CatalogTree>
- [53] SINAMICS S120 drive system. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10354530>
- [54] SINUMERIK ONE MCP 2200c. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10436582?tree=CatalogTree>
- [55] SIMATIC ITC1900 V3. SIEMENS. *SiePortal* [online]. © 1996 -2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6AV6646-1BA18-0NA1>
- [56] DED kit. Prima Additive [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.primaadditive.com/en/technologies/direct-energy-deposition/ded-kit>
- [57] LASERDYNE® 811. *Prima Additive* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.primaadditive.com/en/technologies/direct-energy-deposition/laserdyner-811>
- [58] Coromant Capto®. *SANDVIK* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/turning-tools/internal-turning-tools/coromant-capto>
- [59] Vertikální soustruhy. *SANDVIK* [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machine-tooling-solutions/machines/vertical-lathes>
- [60] Downflo® Evolution Cartridge Dust Collectors. DONALDSON COMPANY. *Donaldson FILTRATION SOLUTIONS* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.donaldson.com/en-us/industrial-dust-fume-mist/equipment/dust-collectors/cartridge/downflo-evolution/>
- [61] Gas solutions for the additive manufacturing. *Air Liquide* [online]. © 2025 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://uk.airliquide.com/solutions/additive-manufacturing-3d-printing/gas-solutions-additive-manufacturing-parts-laser-fused-metal-deposition-lmd-ded>
- [62] MAREK, Jiří. Kalkulace [prezentace] Brno: VUT FSI ÚVSSR, 2023/2024. Interní studijní materiál.

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
v_i	-	Váha kritérií
G_i	-	Geometrický průměr kritérií
H_{ij}	-	Hodnocení variant
b_{ij}	-	Bodové hodnocení variant
k_{ij}	-	Koeficient hodnocení
f_t	mm	Posuv na otáčku
a_p	mm	Hloubka řezu
v_c	m/min	Řezná rychlost
F_c	N	Hlavní (tečná) složka řezné síly
F_p	N	Složka řezné síly
F_f	N	Složka řezné síly
i_r	-	Převodový poměr řemenového převodu
i_p	-	Převodový poměr vložené převodovky
η_r	-	Účinnost řemenového převodu
η_p	-	Účinnost vložené převodovky
η_1	-	Účinnost válečkového ložiska
η_2	-	Účinnost kuličkového ložiska
η_{vr}	-	Celková účinnost ložisek
M_{vmax}	Nm	Moment na vřetení od řezné síly
D_{max}	mm	Maximální průměr obrobku
P_{vmax}	kW	Řezná výkon vřetene
M_{Mmax}	Nm	Moment na motoru od řezné síly
z_2	-	Počet zubů hnané řemenice
t_r	mm	Rozteč zubů řemene
a_{rt}	mm	Teoretická osová vzdálenost řemenic
z_1	-	Počet zubů hnací řemenice
d_{w1}	mm	Průměr roztečné kružnice hnací řemenice
d_{w2}	mm	Průměr roztečné kružnice hnané řemenice
β_{rt}	°	Teoretický úhel opásání hnací řemenice
L_{rt}	mm	Teoretická délka řemene
a_r	mm	Osová vzdálenost řemenic

L_r	mm	Délka řemene
β_r	°	Úhel opásání hnací řemenice
z_{1e}	-	Počet zubů v záběru u hnací řemenice
M_{jm}	Nm	Jmenovitý moment motoru
M_{max}	Nm	Maximální moment motoru
M_1	Nm	Kroutící moment na hnací řemenici
F_u	N	Tažná síla v řemeni
b_r	mm	Šířka řemene
F_r	N	Síla od předpětí řemene
J_m	kg·m ²	Moment setrvačnosti motoru
J_{br}	kg·m ²	Moment setrvačnosti brzdy
J_p	kg·m ²	Moment setrvačnosti vložené převodovky
J_{r1}	kg·m ²	Moment setrvačnosti hnací řemenice
J_{r2}	kg·m ²	Moment setrvačnosti hnané řemenice
J_{vr}	kg·m ²	Moment setrvačnosti vřetene
J_{sk}	kg·m ²	Moment setrvačnosti sklíčidla
J_{ad}	kg·m ²	Moment setrvačnosti adaptérové desky
J_{hv}	kg·m ²	Moment setrvačnosti upínacího válce
J_o	kg·m ²	Moment setrvačnosti obrobku
J_{red}	kg·m ²	Moment setrvačnosti redukováných hmot
t_{jm}	s	Čas rozběhu na jmenovité otáčky
t_{max}	s	Čas rozběhu na maximální otáčky
n_{jm}	min ⁻¹	Jmenovité otáčky motoru
n_{max}	min ⁻¹	Maximální otáčky motoru
t_c	s	Celkový čas rozběhu
a	mm	Vzdálenost od místa řezu po bod A
b	mm	Vzdálenost mezi ložisky
c	mm	Vzdálenost od bodu B po řemenici
m_o	kg	Hmotnost obrobku
m_{sk}	kg	Hmotnost sklíčidla
m_{ad}	kg	Hmotnost adaptérové desky
m_{vr}	kg	Hmotnost vřetene
m_{r2}	kg	Hmotnost hnané řemenice
m_{hv}	kg	Hmotnost upínacího válce
m_{tt}	kg	Hmotnost tažné tyče
F_g	N	Tíhové působení na uložení vřetene
F_{Az}	N	Reakční síla v bodě A ve směru osy z
F_{Ay}	N	Reakční síla v bodě A ve směru osy y

F_{Ax}	N	Reakční síla v bodě A ve směru osy x
F_A	N	Reakční síla v bodě A
F_{By}	N	Reakční síla v bodě B ve směru osy y
F_{Bx}	N	Reakční síla v bodě B ve směru osy x
F_B	N	Reakční síla v bodě B
P_1	N	Ekvivalentní zatížení ložiska 1
L_{10h1}	hod	Hodinová trvanlivost ložiska 1
P_2	N	Ekvivalentní zatížení ložiska 2
L_{10h2}	hod	Hodinová trvanlivost ložiska 2
P_3	N	Ekvivalentní zatížení ložiska 3
L_{10h3}	hod	Hodinová trvanlivost ložiska 3
n_{vrmax}	min^{-1}	Maximální otáčky vřetene
C_1	N	Dynamická únosnost ložiska 1
C_2	N	Dynamická únosnost ložiska 2
C_3	N	Dynamická únosnost ložiska 3
m_k	kg	Hmotnost konzoly
m_p	kg	Hmotnost příčnicku
m_s	kg	Hmotnost suportu
f_{vv}	-	Součinitel tření valivého vedení
v_s	m/min	Rychlost rychloposuvu
d_{s1}	mm	Průměr kuličkového šroubu suportu
s_{s1}	mm	Stoupání kuličkového šroubu suportu
l_{s1}	mm	Vzdálenost mezi ložisky kuličkového šroubu suportu
C_{s1}	N	Dynamická únosnost kuličkového šroubu suportu
F_{s1}	N	Zatížení kuličkového šroubu suportu
n_{s1}	min^{-1}	Otáčky kuličkového šroubu suportu
L_{10hs1}	hod	Trvanlivost kuličkového šroubu suportu
f_n	-	Otáčková součinitel
f_v	-	Vzpěrný součinitel
n_{krs1}	min^{-1}	Kritické otáčky kuličkového šroubu suportu
n_{maxs1}	min^{-1}	Maximální otáčky kuličkového šroubu suportu
F_{krs1}	N	Kritická vzpěrná síla kuličkového šroubu suportu
F_{maxs1}	N	Maximální vzpěrná síla kuličkového šroubu suportu
k_{vz}	-	Koeficient vzpěrné síly
M_{s1}	Nm	Moment kuličkového šroubu suportu
i_{rs}	-	Převodový poměr pohonu kuličkového šroubu suportu
η_s	-	Účinnost kuličkového šroubu

η_{td}	-	Účinnost uložení kuličkového šroubu
d_{s2}	mm	Průměr kuličkového šroubu příčnicku
s_{s2}	mm	Stoupání kuličkového šroubu příčnicku
l_{s2}	mm	Vzdálenost mezi ložisky kuličkového šroubu příčnicku
C_{s2}	N	Dynamická únosnost kuličkového šroubu příčnicku
F_{s2}	N	Zatížení kuličkového šroubu příčnicku
n_{s2}	min ⁻¹	Otáčky kuličkového šroubu příčnicku
L_{10hs2}	hod	Trvanlivost kuličkového šroubu příčnicku
n_{krs2}	min ⁻¹	Kritické otáčky kuličkového šroubu příčnicku
n_{maxs2}	min ⁻¹	Maximální otáčky kuličkového šroubu příčnicku
F_{krs2}	N	Kritická vzpěrná síla kuličkového šroubu příčnicku
F_{maxs2}	N	Maximální vzpěrná síla kuličkového šroubu příčnicku
M_{s2}	Nm	Moment kuličkového šroubu příčnicku
d_{s3}	mm	Průměr kuličkového šroubu konzoly
s_{s3}	mm	Stoupání kuličkového šroubu konzoly
l_{s3}	mm	Vzdálenost mezi ložisky kuličkového šroubu konzoly
C_{s3}	N	Dynamická únosnost kuličkového šroubu konzoly
F_{s3}	N	Zatížení kuličkového šroubu konzoly
n_{s3}	min ⁻¹	Otáčky kuličkového šroubu konzoly
L_{10hs3}	hod	Trvanlivost kuličkového šroubu konzoly
n_{krs3}	min ⁻¹	Kritické otáčky kuličkového šroubu konzoly
n_{maxs3}	min ⁻¹	Maximální otáčky kuličkového šroubu konzoly
F_{krs3}	N	Kritická vzpěrná síla kuličkového šroubu konzoly
F_{maxs3}	N	Maximální vzpěrná síla kuličkového šroubu konzoly
M_{s3}	Nm	Moment kuličkového šroubu konzoly
m_{ch}	kg	Hmotnost chapadla
F_{s4}	N	Zatížení kuličkového šroubu konzoly při AVO
L_{10hs4}	hod	Trvanlivost kuličkového šroubu konzoly při AVO
M_{s4}	Nm	Moment kuličkového šroubu konzoly při AVO
R_{fs}	hod	Roční časový fond stroje
d_r	-	Počet dní v roce
d_v	-	Počet víkendů v roce
d_s	-	Počet svátků v roce
d_o	-	Počet dní oprav v roce
h_d	Hod	Délka pracovní směny
s_d	-	Směnovost
S_{hso}	Kč/hod	Strojní hodinová sazba obráběcího stroje
S_{hsh}	Kč/hod	Strojní hodinová sazba hybridního obráběcího stroje

o_s	%	Odpis stroje
ur_s	%	Úroky stroje
ud_s	%	Údržba stroje
p_s	%	Plochy stroje
e_s	%	Energie stroje
t_p	hod	Čas na přípravu
t_{vo}	hod	Čas na výrobu
N_{ojo}	Kč	Náklady na obrobení jednice na obráběcím stroji
N_{ojh}	Kč	Náklady na obrobení jednice na hybridním obráběcím stroji
M_{jo}	Kč	Mzda na jednici na obráběcím stroji
M_{jh}	Kč	Mzda na jednici na hybridním obráběcím stroji
P_{jo}	Kč	Materiál na jednici na obráběcím stroji
P_{jh}	Kč	Materiál na jednici na hybridním obráběcím stroji
N_{jo}	Kč	Přímé náklady na jednici na obráběcím stroji
N_{jh}	Kč	Přímé náklady na jednici na hybridním obráběcím stroji
N_{Ro}	Kč	Jednorázové náklady na jednici na obráběcím stroji
N_{Rh}	Kč	Jednorázové náklady na jednici na hybridním obráběcím stroji
p_{kkr}	-	Kritický počet kusů
N_{cso}	Kč	Úplné vlastní náklady na jednici na obráběcím stroji
N_{csh}	Kč	Úplné vlastní náklady na jednici na hybridním obráběcím stroji

Zkratka

CNC
PMD
MIG
MAG
PBF
DED
SLM
EBM
MPA
EDS
AVN
AVO

Význam

Computer numerical control
Plasma metal deposition
Metal inert gas
Metal active gas
Powder bed fusion
Direct energy deposition
Selective laser melting
Electron-beam melting
Metal powder application
Engineering data science
Automatická výměna nástrojů
Automatická výměna obrobků

11.2 Seznam tabulek

Tab 1)	Přehled výrobců.....	31
Tab 2)	Kritéria pro volbu vhodné varianty	43
Tab 3)	Stupnice pro vzájemné porovnání kritérií	43
Tab 4)	Porovnání kritérií a určení jejich váhy	44
Tab 5)	Stupnice pro hodnocení variant	44
Tab 6)	Hodnocení variant.....	45
Tab 7)	Multikriteriální analýza variant	45
Tab 8)	Parametry sklíčidla SCHUNK ROTA NCO 500 Z380-SV90° [34]	49
Tab 9)	Parametry adaptérové desky SCHUNK FF-T2 Z380-A8 [35]	50
Tab 10)	Parametry hydraulického válce SCHUNK OPUS-V 175 [36].....	50
Tab 11)	Parametry motoru SIEMENS SIMOTICS M-1PH8133-3FF03-0PA1-Z [37].	51
Tab 12)	Parametry převodovky STOBBER C402_0031ME40 [41].....	51
Tab 13)	Parametry ložiska NN 3026 KTN9/SP [43]	56
Tab 14)	Parametry ložiska BTW 130 CTN9/SP [44]	57
Tab 15)	Parametry ložiska NN 3020 KTN9/SP [45]	57
Tab 16)	Parametry absolutního enkodéru ECA 4000 [46].....	58
Tab 17)	Parametry motoru SIEMENS SIMOTICS S-1FK2105-4AF11-0SA0 [38] ..	63
Tab 18)	Parametry motoru HDD HSM09N-Ma-EC-Ax-A-A30-AAA [40].....	65
Tab 19)	Parametry motoru SIEMENS SIMOTICS S-1FT2210-3AB21-0SA0 [39] ..	66
Tab 20)	Kalkulace ekonomického hodnocení.....	77

11.3 Seznam obrázků

Obr. 1)	Integrace aditivní výrobní technologie a víceúčelového obrábění [4]	19
Obr. 2)	Aditivní výroba [5]	20
Obr. 3)	Soustružnicko frézovací centrum [6].....	20
Obr. 4)	CNC soustruh s lineárním vedením [7]	21
Obr. 5)	Svislý soustruh ČKD SKDY [8].....	22
Obr. 6)	Schéma nanášení materiálu laserem [11]	23
Obr. 7)	Schéma svařování plazmou [30].....	24
Obr. 8)	Aditivní výroba pomocí plazmatu [15]	25
Obr. 9)	Aditivní stroj M3DP [15]	25
Obr. 10)	Aditivní výroba pomocí elektrického oblouku [20]	26
Obr. 11)	Robotické aditivní pracoviště RoboWAAM [21].....	27
Obr. 12)	HERMLE MPA technologie [22].....	27
Obr. 13)	Schéma PBF technologie [24]	28
Obr. 14)	Schéma DED technologie [29]	29
Obr. 15)	Hybridní stroj Lasertec 3000 DED hybrid [6].....	29
Obr. 16)	Hybridní stroj INTEGRIX i-300 AM [4]	30
Obr. 17)	Hybridní stroj LUMEX Avance-25 [27]	30
Obr. 18)	Základní vlastnosti obráběcího stroje	34
Obr. 19)	Ovlivnění částí stroje	35
Obr. 20)	Interakce stroj, okolí, obsluha.....	36
Obr. 21)	Rozbor stavby stroje	37
Obr. 22)	Konzola, příčník a suport varianty A.....	40

	Obr. 23)	Varianta A	40
	Obr. 24)	Konzola, příčnick a suport varianty B	41
	Obr. 25)	Varianta B	41
	Obr. 26)	Konzola, příčnick a suport varianty C	42
	Obr. 27)	Varianta C	42
	Obr. 28)	Váha kritérií ve výsečovém grafu	44
	Obr. 29)	Vlastnosti VBD [32]	47
	Obr. 30)	Výpočet řezné síly pomocí online kalkulátoru ISCAR [33]	48
	Obr. 31)	Uložení vřetene	49
	Obr. 32)	Závislost otáček vřetene na obráběném průměru pro řeznou rychlost 130 m/min	51
	Obr. 33)	Diagram pro výběr synchronních řemenů CONTI SYNCHRODRIVE [42]	53
	Obr. 34)	Rozklad sil působících na uložení vřetene	55
	Obr. 35)	Absolutní enkodér HEIDENHAIN ECA 4000 [46]	59
	Obr. 36)	Model rotační soustavy	59
	Obr. 37)	Model rámu stroje	60
	Obr. 38)	Model konzoly	61
	Obr. 39)	Model příčnicku	61
	Obr. 40)	Model suportu	62
	Obr. 41)	Lineární enkodér HEIDENHAIN LC 100 [47]	62
	Obr. 42)	SINAMICS S120 drive systém [53]	67
	Obr. 43)	Laserová hlava REAL DED head použita ve stroji LASERDYNE® [57]	811 68
	Obr. 44)	Nástrojové bloky vertikálního soustruhu [59]	69
	Obr. 45)	Model vnitřního pevného krytování	69
	Obr. 46)	Model krytování stroje	70
	Obr. 47)	Model automatické výměny nástrojů	71
	Obr. 48)	Model automatické výměny obrobků	72
	Obr. 49)	Filtrační systém Donaldson [60]	73
	Obr. 50)	Model stroje	74
	Obr. 51)	Fiktivní obrobek	75
	Obr. 52)	Graf kalkulace ekonomického hodnocení	78

12 SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace:

- DP sestava stroje
- DP_01_01 sestava vřetene
- DP_01_01 kusovník sestavy vřetene 1
- DP_01_01 kusovník sestavy vřetene 2
- DP_01_01 kusovník sestavy vřetene 3
- DP_01_01_01 výrobní výkres hřídele vřetene
- DP_01_01_02 výrobní výkres náboje 1
- DP_01_01_03 výrobní výkres náboje 2
- DP_01_01_04 výrobní výkres víka 1
- DP_01_01_05 výrobní výkres víka 2
- DP_01_01_06 výrobní výkres labyrintu 1
- DP_01_01_07 výrobní výkres labyrintu 2
- DP_01_01_08 výrobní výkres distančního kroužku 1
- DP_01_01_09 výrobní výkres distančního kroužku 2
- DP_01_01_10 výrobní výkres distančního kroužku 3
- DP_01_01_11 výrobní výkres řemenice
- DP_01_01_12 výrobní výkres tažné tyče
- DP_01_01_13 výrobní výkres držáku enkodéru
- DP_01_01_14 výrobní výkres čelního čepu

3D model:

- DP model stroje

PŘÍLOHY