

# 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

## NÁVRH PLAZMOVÉHO ŘEZACÍHO STROJE

DESIGN OF PLASMA CUTTING MACHINE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Vejrosta

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2024



## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Pavel Vejrosta</b>
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Pavlík, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

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

### NÁVRH PLAZMOVÉHO ŘEZACÍHO STROJE

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení plazmového řezacího stroje. Rozměrové a výkonnostní charakteristiky budou součástí rešerše a návrhu stroje.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.

Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.

Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.

Nezbytné výpočty potřebné pro návrh a dimenzování.

Výkresová dokumentace vybraných uzlů.

Závěr a doporučení pro praxi.

#### **Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed.

Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh plazmového řezacího stroje. Práce začíná představením plazmy jako takové, teorií týkajících se témat důležitých pro pochopení problematiky řezání plazmou a fungování řezacích strojů. Navazuje rešerše a průzkum trhu v oblasti plazmových řezacích strojů. Dále jsou v práci stanoveny konkrétní požadavky a vlastnosti, které jsou nezbytné pro samotný konstrukční návrh stroje. Následuje část, ve které jsou navrženy různé koncepty řešení a výběr optimálních variant hlavních částí stroje, tedy: nosná konstrukce, typ náhonu, lineární vedení, elektropohon, nástroj, zdroj, bezpečnostní a další prvky. Vybrané díly jsou zkontrolovány pomocí konstrukčních výpočtů. Samotný návrh stroje a výkresová dokumentace jsou vytvořeny v programu Solidworks 2023. Závěr práce tvoří prezentace výsledného návrhu, návrh možných vylepšení, porovnání se stanovenými cíli, hrubý cenový odhad, doporučení pro praxi a konečné zhodnocení zpracovaného návrhu plazmového řezacího stroje.

## ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the design of plasma cutting machine. The work begins with an introduction to plasma itself, covering the theory related to topics important for understanding the issues of plasma cutting and the operation of plasma cutting machines. This section is followed by review and market research in field of plasma cutting machines. Furthermore, the thesis establishes specific requirements and characteristics that are necessary for the actual design of the machine. The next section proposes various solution concepts and selects the optimal variants of the main parts of the machine, including supporting structure, type of drive, linear guides, electric drive, plasma torch, power source, safety and other elements. The selected parts are verified using design calculations. The actual design of the machine and the drawing documentation are created in Solidworks 2023. The conclusion of the thesis presents the final design, proposes possible improvements, compares the results with the set goals, and gives a final evaluation of the designed plasma cutting machine.

## KLÍČOVÁ SLOVA

plazma, plazmové řezání, lineární vedení, řezací hlava, elektropohon

## KEYWORDS

Plasma, plasma cutting, linear guides, cutting head, electric drive



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VEJROSTA, Pavel. *Návrh plazmového řezacího stroje*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154068>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Pavlík.



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, panu Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za ochotu a trpělivost, odborné vedení, věcné připomínky, cenné rady, čas strávený při konzultacích a přátelský přístup při zpracovávání bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval kolegům z oddělení konstrukce firmy Innomotics, s.r.o v Drásově, především panu Jaroslavu Stoklasovi a panu Jiřímu Jaroščíkovi za možnost konzultací, jejich odborné názory, rady a za možnost získání konstrukčních zkušeností.

Děkuji také své rodině, přítelkyni a blízkým za podporu při studiu.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Pavlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. 5. 2024

-----  
Pavel Vejrosta

# OBSAH

1 ÚVOD.....	15
2 Plazma .....	16
2.1 Řezání plazmou .....	16
2.1.1 Plazmové plyny .....	17
2.1.2 Fokusační plyny .....	17
2.1.3 Asistentní (ochranné) plyny .....	17
2.1.4 Volba doporučených plynů dle obráběného materiálu.....	18
2.2 Výhody a nevýhody řezání plazmou.....	19
2.3 Další využití plazmy .....	19
2.3.1 Svařování plazmou.....	19
2.3.2 Nanášení povlaků plazmou .....	20
2.3.3 Obrábění plazmou .....	20
2.3.4 Ruční řezačky.....	21
2.4 Porovnání s dalšími metodami řezání materiálu.....	21
2.4.1 Řezání autogenem .....	21
2.4.2 Laserový paprsek .....	21
2.4.3 Vodní paprsek .....	22
2.4.4 Vyhodnocení.....	23
3 Plazmové řezací stroje .....	24
3.1 Průzkum trhu v oblasti plazmových řezacích strojů.....	24
4. Stanovení požadavků a kritérií pro návrh vlastního stroje.....	27
4.1 Rozměr pracovní plochy .....	27
4.2 Tloušťka a druh řezaného materiálu.....	27
4.3 Řezná rychlost a maximální rychlost .....	27
4.4 Přesnost polohování stroje.....	27
4.5 Plánovaný objem vyrobených strojů.....	27
5. Konstrukční řešení stroje.....	28
5.1 Nosná konstrukce .....	28
5.2 Způsob konstrukčního provedení .....	29
5.3 Volba náhonu.....	31
5.4 Výpočet pastorku .....	33
5.5 Výběr typu motoru.....	35
5.6 Výpočet a výběr servomotoru.....	35
5.7 Výběr lineárního vedení .....	40
5.8 Výpočet průhybu nosníku portálu.....	41
5.9 Výběr plazmové řezací hlavy .....	41

5.10 Výběr plazmového řezacího zdroje .....	42
5.11 Zhodnocení .....	42
6. Bezpečnostní a ostatní prvky .....	42
6.1 Energetické řetězy .....	43
6.2 Krytí pastorků .....	43
6.3 Uchycení plazmové řezací hlavy .....	43
6.4 Induktivní senzory .....	44
6.5 Mechanické koncové body .....	44
6.6 Emergency STOP tlačítko .....	44
6.7 Ovládací systém .....	44
7. Cenový odhad navrženého stroje .....	45
8. Zhodnocení a doporučení pro praxi .....	46
9. Závěr .....	47
Seznam použitých zdrojů .....	48
Seznam použitých symbolů, tabulek a obrázků .....	50
Seznam symbolů .....	50
Seznam tabulek .....	52
Seznam obrázků .....	52
Seznam příloh .....	53

## 1 ÚVOD

Moderní průmyslové procesy často vyžadují přesné a efektivní metody řezání kovu. Stále se zvyšujících požadavků lze dosáhnout pomocí několika technologií. Mezi nejrozšířenější patří řezání plazmovým paprskem, především díky schopnosti rychle a přesně řezat různé druhy kovů. Vysoká přesnost a rychlost řezání, společně s nižšími provozními náklady, činí z plazmového řezání výhodnou variantu pro mnohé výrobní procesy ve strojírenství. Navíc plazmové řezání umožňuje zpracování silnějších materiálů, což jej činí vhodným pro těžký průmysl a stavebnictví.

Tato bakalářské práce je zaměřena na návrh plazmového řezacího stroje, který splňuje požadavky současného trhu na efektivitu a kvalitu. Úvodem práce je nutné nastínit problematiku plazmového řezání, vysvětlit základní principy a porovnat tuto technologii s dalšími možnostmi dělení kovu, jako je například laserové a vodní řezání. Následně bude provedena krátká rešerše a průzkum trhu v oblasti plazmových řezacích strojů, což pomůže identifikovat nejnovější trendy a technologie. Na základě získaných informací stanovit požadavky a parametry pro vlastní návrh plazmového stroje, včetně požadavků na výkon, přesnost a spolehlivost.

Konstrukční část bakalářské práce se bude zabývat volbou a zpracováním klíčových prvků stroje, včetně nosné konstrukce, pohonných a řídicích prvků, řezací hlavy, zdroje a bezpečnostních opatření. Varianty řešení těchto komponent budou krátce srovnány a na základě definovaných požadavků bude vybráno a zpracováno optimální řešení. Pro vytvořený návrh je dále potřeba provést kontrolní výpočty, které ověří jeho funkčnost. Závěrem budou slovně zhodnoceny dosažené výsledky, doporučeny rady pro praxi a navržena možná vylepšení.

Navržený stroj bude následně vymodelován v 3D softwaru, což umožní zhotovení výkresové dokumentace pro vybrané díly a sestavy. Tento přístup zajistí, že návrh bude detailně zpracován a také poskytne vizualizaci konečného řešení, čímž usnadní jeho výrobu a implementaci.

## 2 PLAZMA

V úvodu je nutné vysvětlit podstatu plazmy a její využití nejen ve strojírenství. Plazma je čtvrté skupenství, které je možná méně známé pro běžného člověka, tvoří však až 99% pozorovatelné vesmírné hmoty a jedná se tudíž o absolutně nejrozšířenější formu látky. V přírodě se vyskytuje v mnoha formách. Mezi konkrétní příklady se řadí polární záře, blesk, ve vesmíru pak mlhoviny, ionosféry, sluneční vítr a konvenční hvězdy. V těchto formách se však parametry a hodnoty plazmatu liší o několik řádů od těch ve strojírenství. V běžném životě se s ní každý z nás setkává v obrazovkách starších plazmových televizorů, počítačů a další elektroniky, dále pak v zářivkách a samozřejmě ve strojírenství, například u plazmových řezacích strojů. Z pohledu strojírenství lze pak plazmu, kterou používáme k dělení materiálu, popsat jako ionizovanou, elektricky vodivou substanci podobnou plynu. Pracovní plyn lze transformovat na plazmu ohřevem na vysoké teploty blízké se až 30 000 °C. Plazma je podobná plynným látkám v tom smyslu, že jednotlivé atomy nejsou vzájemně polohově vázány. Pokud je plazma vystavena elektrickému, či magnetickému poli, z pohledu pohybu atomů je pak svým chováním přirovnatelná ke kapalinám. [2] [3]



Obrázek 1 Plazma ve formě blesku [28]

### 2.1 Řezání plazmou

Řezání plazmovým paprskem se řadí do skupiny nekonvenčních metod obrábění. To znamená, že se při obrábění a dělení materiálu nevyužívají klasické nástroje, u kterých je možné určit pracovní části (břit, čelo, ostří, atd.) nebo nástrojové úhly. Úběr materiálu navíc probíhá bez vzniku třísek na rozdíl od standardních metod, jako jsou například soustružení, nebo frézování. Nekonvenční metody pracují na principu tepelných, chemických, případně i mechanických (převážně abrazivních) účinků. Často také dochází k jejich vzájemné kombinaci. Paprsek plazmy se pak řadí do termoelektrického (elektrotepelného) procesu obrábění. Využívá se zde teplotních a dynamických účinků plazmatu. [2] [3] [7]

Technologie obrábění plazmovým paprskem spočívá v postupném odtavování obráběného materiálu. Toho dosáhneme dodáním energie pracovnímu plynu, který se tak stane elektricky vodivým. Typicky se stlačený plyn dostane do kontaktu s elektrodou, dojde k ionizaci, která způsobí další nárůst tlaku. Proud plazmy je pak tlačěn směrem k řezací hlavě, kde je usměrněn do paprsku směřujícího k obrobku. Jelikož je plazma elektricky vodivá, obráběný materiál je uzemněn skrz nosnou konstrukci (řezací stůl). V místě kontaktu plazmového paprsku dochází k odtavování materiálu, který je následně spolu s oxidy vyfukován z místa řezu plazmovým plynem. [2] [3] [7]

Pro správné hoření elektrického oblouku je potřebné současně dodávat pracovní médium. To se obecně dělí do následujících složek:

### 2.1.1 Plazmové plyny

- Jsou přiváděny do elektrického oblouku, kde jsou ionizovány a vytvářejí plazmový paprsek.

- **argon (Ar), vodík (H<sub>2</sub>), dusík (N<sub>2</sub>), helium (He), kyslík (O<sub>2</sub>) a vzduch.**

- Dle obráběného materiálu se volí vhodný plyn, nebo kombinace plynů. Je důležité si uvědomit, že volba plazmového plynu ovlivňuje kvalitu a rychlost řezání, ale také rychlost opotřebení trysek a zejména náklady a s tím spojenou výslednou cenu celého procesu.

Elektrický oblouk má vzhledem k použitému plynu tyto teploty:

Tabulka 1 Teploty oblouku [4]

Plazmový plyn	Teplota [K]
vodík	8 000
dusík	7 000
argon	15 000
helium	20 000

### 2.1.2 Fokusační plyny

- Slouží k zaostření paprsku plazmatu po výstupu z trysky.

- **argon, dusík**, kombinace **argon + vodík** nebo **argon + dusík**.

### 2.1.3 Asistentní (ochranné) plyny

- Obklopují paprsek plazmatu a pracovní místo obráběného materiálu, za účelem ochrany proti nepříznivým účinkům okolní atmosféry.

- **argon a dusík**



Obrázek 2 Řezání plazmou [3]

## 2.1.4 Volba doporučených plynů dle obráběného materiálu

Tabulka 2 Doporučené parametry pro plazmové řezání [5]

Obráběný materiál	Doporučená tloušťka [mm]	Plazmový plyn	Sekundární plyn	Vlastnosti/charakteristika řezu
konstrukční ocel	0,5-8	- kyslík	- kyslík - kyslík + dusík - dusík	- tolerance kolmosti (pravoúhlosti) podobná laseru - hladké okraje bez otřepů
konstrukční ocel	4-50	- kyslík	- kyslík + dusík - vzduch - dusík	- do 25 mm tolerance kolmosti (pravoúhlosti) podobná laseru - hladké plochy řezu - bez otřepů do 20 mm
vysoce legovaná ocel	1-6	- kyslík	- dusík - dusík + vodík	- nízká tolerance kolmosti (pravoúhlosti) - hladké okraje bez otřepů
vysoce legovaná ocel	5-45	- argon - vodík - dusík	- dusík - dusík + vodík	- nízká tolerance kolmosti (pravoúhlosti) - hladké plochy řezu - bez otřepů do 20 mm
hliník	1-6	- vzduch	- dusík - dusík + vodík	- téměř svislý (vertikální) řez - bez otřepů - horší kvalita povrchu (vyšší drsnost, zrnitost)
hliník	5-40	- argon - vodík - dusík	- dusík - dusík + vodík	- téměř svislý (vertikální) řez - bez otřepů do 20 mm - horší kvalita povrchu (vyšší drsnost, zrnitost)

## 2.2 Výhody a nevýhody řezání plazmou

### Výhody:

- možnost řezání všech elektricky vodivých kovových materiálů
- možnost provozu více hořáků
- vysoká rezná rychlost (až 10x vyšší, než řezání plamenem)
- dobrá kvalita řezu konstrukčních ocelí tloušťky cca 1 až 30 mm (legovaná ocel – 0,6 až 70 mm, hliník – 0,6 až 100 mm)
- maximální tloušťka prořezu konstrukčních ocelí až 40 mm, legovaných ocelí až 100 mm a hliníku až 150 mm.
- CNC stroje dosahují vysoké přesnosti a opakovatelnosti
- možnost řezání pod vodou pro malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu
- cenově výhodné zejména pro slabé a střední tloušťky konstrukčních ocelí a hliníku
- možnost plné automatizace

### Nevýhody

- větší oblast tepelného ovlivnění než u řezání laserem
- horší kvalita řezu u tenkých obrobků v porovnání s laserem
- dosah nižších maximálních tlouštěk v porovnání s řezáním vodním paprskem a plamenem
- tolerance nejsou tak přesné, jako u řezání laserem.
- širší rezná spára
- větší hlučnost

## 2.3 Další využití plazmy

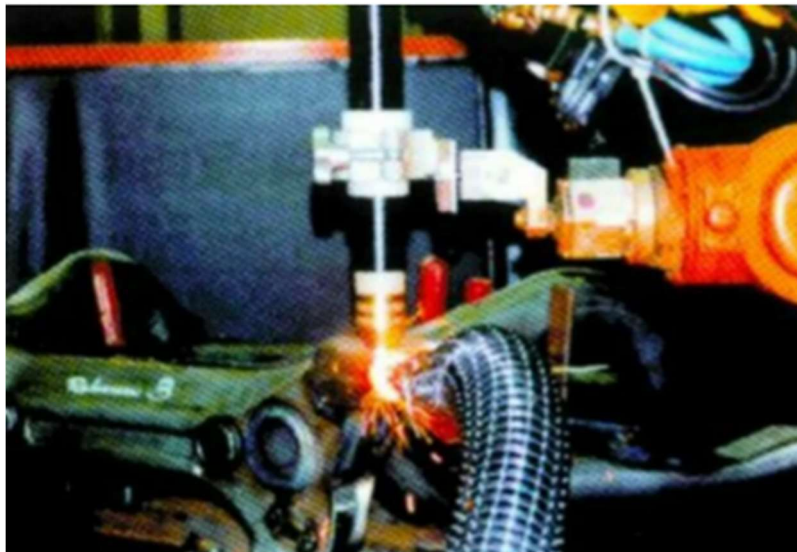
### 2.3.1 Svařování plazmou

Svařování plazmovým obloukem (anglicky: Plasma arc welding – PAW) je proces taveného svařování využívající netavné elektrody a elektrického oblouku tvořeného ionizovaným plazmovým plynem a svařovaným materiálem. Podobně jako u metody TIG je elektroda z wolframu a celý proces svařování probíhá v ochranné atmosféře interního plynu. Plazmový hořák za intenzivního chlazení, usměřuje oblouk na poměrně úzkou plochu svařence. Zvýšení hustoty energie se také dosahuje za pomoci ochranných (fokusačních) plynů.

Na základě tepla a dynamických vlivů oblouku vzniká charakteristický otvor na přední straně tavné lázně. Tento prvek je odborně označován jako keyhole neboli „klíčová dírka“. Posuv plazmového hořáku ve směru svařování, na základě povrchových napětí, umožní opětovné spojení svařovaného materiálu za „klíčovou dírkou“. Díky tomuto efektu lze pak svařovat tupé svary do tloušťky cca 8 mm na jeden průchod bez nutnosti úpravy svarového úkosu. [7]

Výhodou plazmového svařování je především vysoká stabilita oblouku i při nízkých parametrech. Velká koncentrace tepla zajistí hluboké natavení svařovaných materiálů, ale zároveň malou tepelně ovlivněnou oblast. Obecně pak dosahujeme vysoké rychlosti

svařování, kvality a produktivity celého procesu, za výrazné úspory přídavného materiálu a pracovního času věnovanému přípravě svařovaných ploch. [7]



Obrázek 3 Svařování plazmou [7]

### 2.3.2 Nanášení povlaků plazmou

Zařízení určená pro nanášení povlaků plazmovým nástřikem umožňují nanášet železné i neželezné kovy (např. karbidy, wolfram, chrom, nikl, ...), keramické materiály, sklo a plasty. Technologie plazmového povlakování se opírá především o **adhezní** (tj. schopnost různých materiálů k sobě vzájemně přilnout) vlastnosti nanášeného a základního materiálu. V některých případech se také uplatní princip **difuze** (tj. částice / látky mají tendenci se přesouvat z prostředí s vyšší koncentrací do prostředí s nižší koncentrací). [7]

Nanášený materiál lze přivádět v podobě prášku, drátu nebo tyčinky. Následně je v hořáku taven a vrhán na povrch součásti rychlostí cca 180 až 200 m/s. Z důvodu zvýšení přilnavosti je třeba povrch součásti dokonale očistit (odmastit). [7]

Vznikají tak povlaky odolné proti otěru, korozi, vysokým teplotám a rázům, nebo působení chemických látek a reakcí. Tloušťka naneseného povlaku se pohybuje mezi 2 až 5 mm. Proces je plně automatizován, což zajistí vysokou kvalitu a homogenitu povlaku. [7]

### 2.3.3 Obrábění plazmou

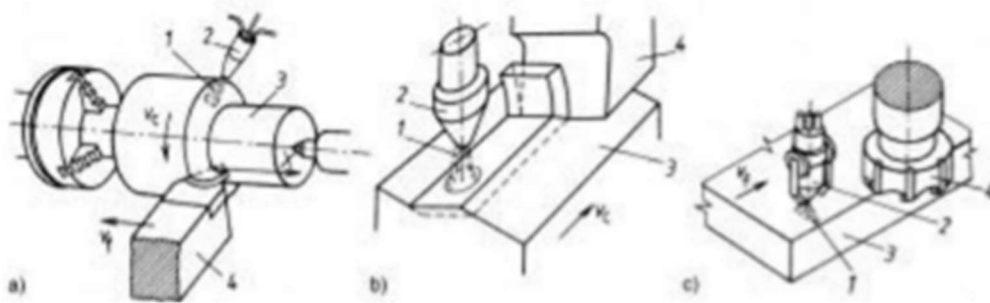
Plazmu lze k obrábění využít dvěma způsoby: jako přehřev materiálu před řezným nástrojem, nebo pro odtavování materiálu z povrchu obrobku.

Zahřátím materiálu se mění jeho mechanické a fyzikální vlastnosti. Zejména dochází ke snížení pevnosti a tvrdosti obráběné součásti. Na řezný nástroj pak působí menší řezné síly, což se ve výsledku projeví na výrazném zvýšení trvanlivosti nástroje (až o 400 %). Nejčastější využití této metody je při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, nebo při výrobě extrémně dlouhých dílů. [4] [7]

Tavicí metoda obrábění spočívá v natavení povrchu obrobku a následném odvodu materiálu asistenčním plynem. Využívá se pouze pro hrubování, jelikož výsledný povrch má velkou drsnost a tepelně ovlivněnou oblast. [4] [7]

### 2.3.4 Ruční řezačky

Ruční plazmové řezání se využívá i ve výrobních závodech (zámečnické dílny, atd.), často jako náhrada za dražší a pomalejší strojní řezání plazmatem. Ruční řezačky jsou také vhodné pro osobní účely a domácí dílny. Největší výhodou ručních plazmových řezaček je samozřejmě v jejich kompaktnosti a pořizovacích nákladech oproti CNC strojům. Cenové rozmezí se pohybuje v rozmezí 3 - 200 tisíc Kč. Mezi největší faktory ovlivňující cenu patří tloušťka efektivního (kvalitního) řezu a maximální dělitelná tloušťka. Nevýhodou je menší výkon, dosahovaná přesnost a konzistentnost řezaných dílů.



Obrázek 4 Obrábění s předehřevem materiálu [8]

a) soustružení, b) hoblování, c) frézování

1 – paprsek plazmatu, 2 – plazmový hořák, 3 – obrobek, 4 – nástroj

## 2.4 Porovnání s dalšími metodami řezání materiálu

Cílem této kapitoly je porovnat metodu řezání plazmou s dalšími nejvíce rozšířenými metodami využívanými ve strojírenství především k vyřezávání z plechových polotovárů. Hodnoceno bude řezání plamenem, laserem, vodním paprskem a samozřejmě plazmou. Každá zmíněná metoda bude nejprve stručně charakterizována a vysvětlena, následně pak společně zhodnocena.

### 2.4.1 Řezání autogenem

Řezání kyslíkem spočívá ve spalování řezaného materiálu. Povrch je nejprve třena zahřát na zápalnou teplotu a po přivedení řezného kyslíku dojde ke spalování materiálu – exotermické reakci. Vzniklé oxidy jsou vyfukovány ve formě strusky proudem kyslíku. Základem dobré kvality řezu je podmínka, že tavicí teploty řezaného kovu a vznikajících oxidů, musí být vyšší, než je teplota tavení obráběného materiálu. Pro udržení řezného procesu je důležité zajistit uvolňování dostatečného množství tepla při hoření. [8]

Kyslíkem lze dělit tloušťky dosahující až 1 000 mm nicméně nejčastěji se pálí do cca 300 mm. Řezání autogenem je však omezeno samotnou technologií procesu na dělení pouze nelegovaných a v některých případech nízkolegovaných ocelí. [8]

### 2.4.2 Laserový paprsek

Technologii laserového paprsku lze zjednodušeně vysvětlit jako metodu zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Výsledkem je vytvoření úzkého svazku fotonů. Laserové světlo je monochromatické neboli jednobarevné a má velmi malou rozbíhavost. Podrobnější princip

fungování laseru vysvětluje kvantová fyzika. Samotné lasery lze pak dělit například na pevnolátkové (Nd - YAG laser), plynové (**CO<sub>2</sub> laser**), **vláknové**, kapalinové a polovodičové. Mezi nejrozšířenější patří CO<sub>2</sub> lasery, které jsou však v současné době mnohdy nahrazovány vláknovými lasery. [9]

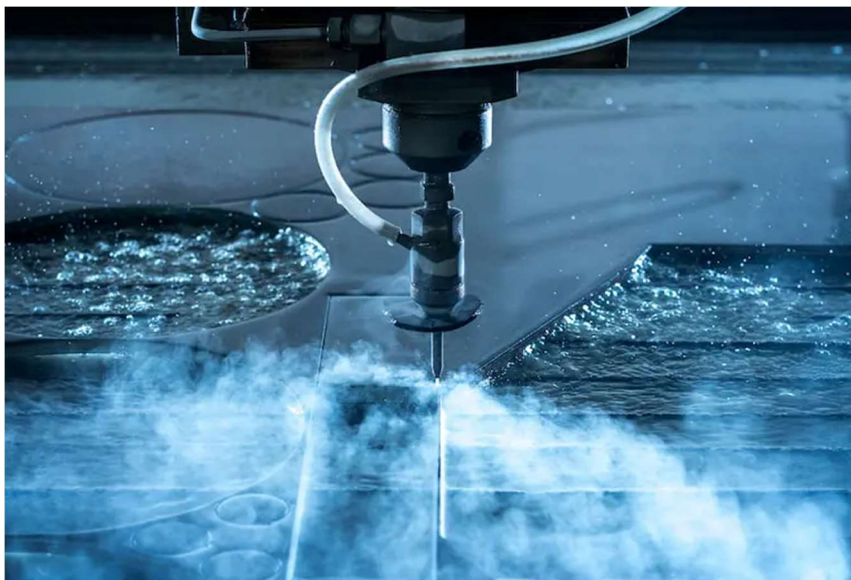
Velkou výhodou CO<sub>2</sub> technologie je možnost řezání kovových i nekovových materiálů větších tloušťek. Oproti vlákně jsou však často velmi rozměrné, provozně dražší a méně efektivní.

Vláknový laser se řadí mezi nejprogressivnější technologie řezání. Umožňuje sice pracovat jen s kovovým materiálem menších tloušťek a prvotní pořizovací náklady bývají vysoké, ale ve spoustě jiných ohledů nemá konkurenci. Mezi největší benefity patří vysoká řezná rychlost, efektivita a přesnost, dosahovaná za nízké spotřeby elektrické energie a provozních nákladů. Díky výborné kvalitě výpalku není třeba dalšího opracování. Ekonomická návratnost takového stroje je mnohdy v řádu jednotek let. [8]

### 2.4.3 Vodní paprsek

Podstatou technologie dělení materiálu pomocí vodního paprsku jsou abrazivní vlastnosti vodního proudu, který je konvergující dýzou (tryskou) usměrněn na velmi malou plochu obrobku. Vysoká kinetická energie vody následně způsobí úběr materiálu. K dělení měkkých materiálů většinou postačí čistý vodní paprsek. V ostatních případech se využívá přídavný abrazivní materiál. Mezi nejčastěji používané příměsi patří olivín a granát. Pracovní tlak vody se pohybuje mezi 500 až 4200 bary a je ho dosaženo speciálním vysokotlakým čerpadlem. [10]

Standardní přesnost řezu je cca 0,1 mm. Výhodou je minimální tepelné ovlivnění povrchu, schopnost dělení elektricky nevodivých materiálů a šetrnost k životnímu prostředí. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, obtížnost řezání velkých tloušťek a možná degradace některých materiálů při kontaktu s vodou (například změna barvy). [10]



Obrázek 5 Řezání vodním paprskem [29]

## 2.4.4 Vyhodnocení

Tabulka 3 Porovnání metod řezání plechu [6] [10]

	Investiční náklady	Provozní náklady	Energetická náročnost	Materiály	Tloušťka materiálů [mm]	Tepelné ovlivnění materiálu	Šířka řezné spáry
<b>Autogen</b>	nízké	velmi vysoké	vysoká	konstrukční ocel	≤ 250	velmi velké	velká
<b>CO<sub>2</sub> laser</b>	vysoké	vysoké	vysoká	kovy, plast, dřevo, textil, kůže, ...	≤ 50	střední	malá
<b>Vláknový laser</b>	velmi vysoké	velmi nízké	velmi nízká	kovové materiály	≤ 30	malé	velmi malá
<b>Vodní paprsek</b>	vysoké	vysoké	vysoká	všechny vodou nedegradující materiály	≤ 250	žádná	větší
<b>Plazma</b>	nízké	střední	vysoká	všechny elektricky vodivé materiály	≤ 100	střední (možnost chlazení vodou)	střední

## 3 PLAZMOVÉ ŘEZACÍ STROJE

Tato kapitola je zaměřena na popis CNC plazmových řezacích strojů. Jak již bylo zmíněno, řezání plazmou je moderní a efektivní metoda dělení materiálu. CNC (Computer Numerical Control) plazmové řezací stroje představují pokročilou variantu těchto zařízení. Díky automatizaci pracovního procesu umožňují efektivní výrobu požadovaných součástí s výbornou přesností a opakovatelností. Základní princip fungování CNC plazmových řezacích strojů spočívá v řízení pohybů nástroje (řezací hlavy), nad obráběným materiálem, dle zadaných příkazů v ovládacím softwaru. Mezi hlavní funkce softwaru patří:

1. **Programování řezných operací:** Vytváření programů, které určují požadované řezy a tvary pro daný výrobek. Uživatel může program vytvářet ručně, pomocí programovacího jazyka, nebo využít importu a případné editace z CAD (Computer-Aided Design) programů.
2. **Nastavení řezných parametrů:** Definice požadované řezné rychlosti, proudu plazmatu, tloušťky řezaného materiálu, atd.
3. **Ovládání stroje:** Poskytuje obsluhu rozhraní pro ovládání a monitorování samotného stroje. Uživatel může spouštět, pozastavovat nebo zastavovat řezné operace, kontrolovat polohu a stav nástroje a provádět další operace spojené s provozem daného stroje.
4. **Optimalizace řezných tras:** Pokročilé softwarové nástroje umožňují optimalizaci řezné trasy za účelem maximalizace efektivnosti a redukce odpadu. Hlavními benefity jsou optimalizace pořadí a orientace jednotlivých řezů, minimalizace pohybů řezné hlavy a času potřebného pro dokončení procesu.
5. **Diagnostika a monitorování:** Možnost diagnostiky a monitorování stavu stroje, zobrazení alarmů a chybových hlášení. Dále pak kontrolu napětí, proudu plazmatu, teploty řezné hlavy a dalších důležitých parametrů. Díky včasnému identifikování problému stroje je možno zabránit případným poruchám a poškozením stroje, ale také pracovním úrazům.

### 3.1 Průzkum trhu v oblasti plazmových řezacích strojů

Při návrhu a vývoji vlastního řešení CNC plazmového řezacího stroje je důležité získat informace o současném stavu trhu a možnostech řešení klíčových prvků stroje. Analýza trhu umožňuje lépe porozumět požadavkům zákazníka, poskytuje možnost inspirovat se již ověřenými metodami a postupy, technologickými trendy a dává informace o konkurenceschopnosti výsledného produktu.

Mezi nejznámější a největší české výrobce CNC plazmových řezacích strojů patří firmy Vanad a Raptor Technologies, ze zahraničních firem je pak třeba zmínit společnost Lincoln Electric – Torchmate. Následující část bakalářské práce bude věnována krátkému představení vždy jednoho stroje, z produkce výše uvedených výrobců.

1. **Vanad:** Plazmový řezací stroj **Vanad KOMPAKT** je výrobcem prezentován jako moderní, vysoce výkonné a přesné řešení v oblasti termického dělení materiálu. Stroj lze rozšířit o příslušenství umožňující navrtávání, značení a popisování. Při modifikaci je schopen sloužit jako nosič speciální technologie (frézování, vrtání). [11]

Stroj je dodáván v několika rozměrových variantách [pracovní šířka stroje x pracovní délka stroje] od 1200x2290 mm až po 2200x6530 mm. Doporučená standardní síla děleného materiálu je stanovena výrobcem na 50 mm.[11]



Obrázek 6 Stroj Vanad KOMPAKT [11]

2. **Raptor Technologies:** Vzorová konfigurace **CNC plazma Raptor 3015** zákazníkovi slibuje maximální možnou přesnost, čistotu řezu, výkon a robustní konstrukci stroje. V ceně je zahrnut ovládací panel se softwarem, plazmový zdroj (200 A) včetně strojního hořáku, odsávání a další benefity. Mezi volitelným příslušenstvím najdeme další varianty zdroje, 4. osu pro pálení trubek a jeklů, modifikace umožňující gravírování a vrtání. Stroj je také možno rozšířit o další, například autogenní, pracovní hlavu. [12]

Velikost pracovního prostoru této konfigurace je 3000x1500 mm. Doporučená tloušťka děleného materiálu pro základní plazmový zdroj (200 A) je 1-30 mm, u příplatkových variant až 60 mm. [12]

Je třeba zmínit, že firma Raptor Technologies se jako výrobce snaží maximálně přizpůsobit individuálním požadavkům zákazníka. Vybraná konfigurace je tedy spíše příkladem možného řešení stroje.[12]



Obrázek 7 CNC plazma Raptor 3015 [12]

3. **Lincoln Electric: Model Torchmate X** se pyšní robustností stroje, výbornou kvalitou řezu a životností spotřebních dílů. Výrobce uvádí, že díky systému FlexCut, není třeba žádné kontroly plynu, až pro tloušťku cca 25 mm. Díky unifikaci systému a všech kritických dílů (stůl, řízení pohybu a řezací nástroj) je firma schopna poskytnout jistotu, že všechny části jsou navrženy jedním výrobcem pro společné použití a kompatibilitu. [13]

Pracovní plocha stroje začíná od 1524 x 3048 mm (5 x 10 stop) až po 2438x6705 mm (8 x 22 stop). Stroj je standardně dodáván se zdrojem FlexCut 80 vhodným pro tloušťky do 25 mm, nebo zdrojem FlexCut 125 pro tloušťku až 38 mm. [13]



Obrázek 8 Lincoln Electric - Torchmate X [13]

Nedílnou součástí návrhu, ale i následného provozu CNC plazmových řezacích strojů je zajištění ovládacího systému, zdroje, spotřebního materiálu a jiného příslušenství. Lze předpokládat, že některé spotřební části stroje, jako například rošty pracovního stolu, bude firma schopna sama doplňovat (vyrábět) interně, dle svých potřeb. V případě plazmových zdrojů, ovládacího softwaru a částí pálících hlav je však zapotřebí vybrat kvalitního a spolehlivého dodavatele. Zde je klíčovým faktorem kvalita produktů a technické podpory ze strany dodavatele. Dobře zvolený dodavatel zaručí spolehlivost, výkon a dlouhou životnost stroje, což je zásadní pro efektivní provoz a kvalitu výrobků. Vhodné firmy dodávající příslušenství pro plazmové řezání jsou například Hypertherm a ESAB. Jednotlivé firmy a vybrané produkty budou představeny později v kapitole týkající se konstrukčního návrhu stroje.

## 4. STANOVENÍ POŽADAVKŮ A KRITÉRIÍ PRO NÁVRH VLASTNÍHO STROJE

Před navržením vlastního plazmového řezacího stroje je nezbytné specifikovat požadavky a kritéria, určující následující vývoj a realizaci projektu.

### 4.1 Rozměr pracovní plochy

Při stanovení požadované pracovní plochy stroje je nutné brát v potaz nejprve maximální velikost výpalků, vyráběných na navrhovaném stroji. Následuje volba dodavatele polotovarů a s tím spojené normalizované rozměry hutního materiálu. Mezi nejznámější prodejce patří Feron a Feromat.

Předpokládáme, že naše firma, nebo zákazník, využije navrhovaný stroj zejména pro výrobu malých, případně středně velkých výpalků. Plechy lze dle způsobu výroby dělit na válcované za tepla a za studena. Optimálním normalizovaným rozměrem plechů pro nás bude **1000x2000 mm**.

### 4.2 Tloušťka a druh řezaného materiálu

Prvním krokem bude opět zohlednění předpokládané maximální tloušťky a samotného materiálu výpalků. Je možné, že v některých případech právě v této fázi návrhu dojde k přehodnocení výběru řezacího stroje (laser, vodní paprsek, atd.). Držme se výše stanoveného rozměru pracovní plochy, tedy 1000x2000 mm.

Firma Feron v těchto rozměrech nabízí několik možností – ocelové plechy válcované za tepla, otěruvzdorné ocelové plechy, dále pak nerezové, hliníkové, měděné a mosazné plechy. Dle nabízených rozměrů, předpokládáme zvolenou tloušťku výpalků v rozmezí **1 až 25 mm**.

### 4.3 Řezná rychlost a maximální rychlost

V závislosti na potřebách výrobního procesu a požadované produktivitě je také potřeba specifikovat požadovanou rychlost řezání.

Například: **500 mm/min** pro jemné řezání a velké tloušťky plechu, **2500 mm/min** pro rychlou výrobu tenkých prvků.

### 4.4 Přesnost polohování stroje

Aplikace a využití výrobků určuje nároky na požadovanou přesnost výpalků. Pro strojírenství zvolme požadovanou přesnost polohování **± 0,1 mm**. Omezením je také samotná technologie plazmového řezání, která o moc přesnější výrobu neumožňuje.

### 4.5 Plánovaný objem vyrobených strojů

Celkové množství vyrobených strojů se samozřejmě výrazně promítne na zvolené strategii při navrhování produktu. S rostoucím počtem kusů je dobré uvažovat o insourcingu co nejvíce součástí a prvků stroje. Výhodou je především plná kontrola kvality, flexibilita, snížení nákladů a také ochrana know-how. U malých sérií je naopak vhodné využít co nejvíce standardizovaných dílů a polotovarů, čímž lze minimalizovat náklady spojené s vývojem a následnou výrobou vlastních řešení.

**Předpokládaný počet kusů** navrhovaného plazmového řezacího stroje se pohybuje v **řádu jednotek**.

## 5. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ STROJE

### 5.1 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce je klíčový prvek CNC plazmových řezacích strojů, nesoucí celou váhu stroje a páleného materiálu a zjišťující stabilitu při procesu řezání. Správně navržená konstrukce a volba vhodných materiálů jsou zásadní pro minimalizaci vibrací a deformací, což má přímý vliv na kvalitu výsledných výpalků. Nosná konstrukce by měla být dostatečně pevná a odolná, aby udržela stroj při požadovaných řezných rychlostech a zátěžích. Zároveň je při návrhu stroje dobré minimalizovat přenos vibrací na pracovní plochu a zajistit co možná nejpřesnější pohyb řezací hlavy.

Mezi některé možnosti řešení nosné konstrukce pro CNC plazmový řezací stroj patří například:

- V<sub>1</sub> – použití hliníkových profilů a dílů (například Item24) [14]
- V<sub>2</sub> – využití normalizovaných a standardizovaných hutních polotovarů (Feron) [15]
- V<sub>3</sub> – výroba vlastních (custom made) dílů přímo na míru potřebám stroje (obrobky, výlisky, odlitky atd.)

Varianty řešení budou srovnány v krátké multikriteriální analýze. Jednotlivá hodnocení budou nejprve krátce okomentována. Každé kritérium bude následně hodnoceno na stupnici 0–10 a násobeno váhou jednotlivého kritéria.

**Pořizovací cena:** Nejlevnější variantou řešení jsou standardizované a normalizované hutní polotovary. Hliníkové profily pak bývají zpravidla o něco dražší a ekonomicky i časově nejnáročnější je výroba vlastních dílů.

**Jednoduchost:** Hliníkové profily jsou díky stavebnicovému systému MB (výrobce item24) nejjednodušší variantou řešení nosné konstrukce stroje. Použití normalizovaných hutních polotovarů je pak lehce složitější, především díky nutnosti dalšího opracování (svařování, vrtání, broušení, ...). Časově i výrobně nejdražší variantou jsou pak vlastní navržené díly.

**Přesnost:** Největší přesnost a preciznost mají vlastní prvky, navržené přímo pro potřeby stroje. U hutních polotovarů lze pak předpokládat lehce větší přesnost a konzistenci rozměrů než u hliníkových profilů.

**Nosnost:** Díky flexibilitě vyráběných dílů lze dle potřeby vhodně dimenzovat nosné prvky stroje, což dává konstruktérovi plnou kontrolu nad nosností. Standardizované hutní polotovary nabízejí větší nosnost než hliníkové profily díky široké škále dostupných tvarů a rozměrů.

**Tuhost:** Vhodná volba hliníkových profilů může zajistit požadovanou tuhost konstrukce. Hutní polotovary však mají předpoklad dosáhnout lepších výsledků oproti hliníkovým profilům. Vyráběné díly, podobně jako v případě nosného kritéria, poskytují největší potenciál pro celkovou tuhost výsledného stroje.

Tabulka 4 Vyhodnocení volby nosné konstrukce

varianta	hodnocené kritérium					celkem
	cena	jednoduchost	přesnost	nosnost	tuhost	
váha	2	1,5	1	1	1	-
V <sub>1</sub>	5	<b>9</b>	5	5	6	44 b
<b>V<sub>2</sub></b>	<b>7</b>	8	6	7	8	<b>47 b</b>
V <sub>3</sub>	3	6	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	41 b

Vyhodnocení: Na základě analýzy je nejlepší volbou použití normalizovaných a standardizovaných hutních polotovarů. Tato varianta kombinuje výhody jednoduchosti, přesnosti a zejména cenové dostupnosti, přičemž splňuje předpokládané požadavky na nosnost a tuhost plazmového řezacího stroje. Základní předpoklad je svaření nosné konstrukce a s tím spojená (technologem zvolená) povrchová úprava – broušení, očištění a odmaštění povrchu. Pro navazující montované (šroubované) prvky je nutno počítat s vrtáním otvorů a vyřezáváním závitů. V případě nedostačující tloušťky stěny použitého profilu lze použít metodu Flow drill. Výsledkem bude dosažení větší délky závitu.



Obrázek 9 Hutní polotovary [15]



Obrázek 10 Hliníkový stavebnicový systém MB [14]

## 5.2 Způsob konstrukčního provedení

Samotné konstrukční provedení má přímý vliv na výsledné parametry stroje. Hlavním prvkem CNC plazmového řezacího stroje je portálová konstrukce, která dle provedení může vykonávat pohyb v ose X a zároveň sloužit jako nosný prvek pro osy Y a Z. Základním předpokladem portálu je dobrá nosnost a tuhost. Možnými variantami provedení jsou:

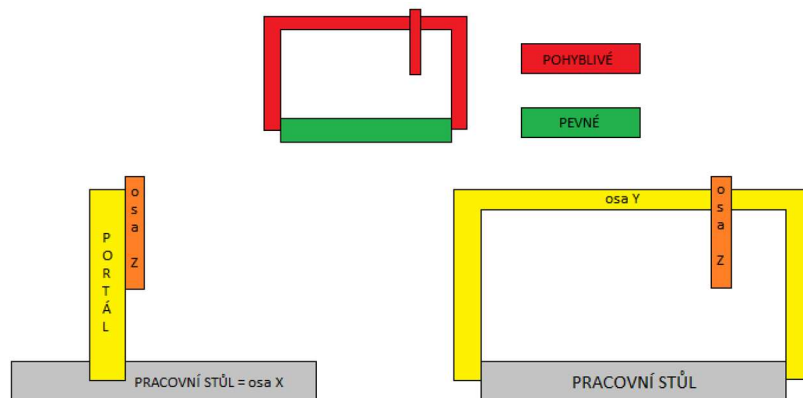
1) Spodní gántry: Celá portálová konstrukce vykonává pohyb v ose X. Stojany po obou stranách jsou v dolní části posouvány saněmi po loži, v horní části jsou spojeny pohyblivým nebo nepohyblivým příčnickem, na který je připevněn náhon a vedení os Y a Z. Mezi výhody patří dobrá stabilita, přesnost, kompaktnost. Nevýhodou je omezená pracovní výška především kvůli velkým setrvačným účinkům, větší zátěž na pohon a vedení ose X. Déle pak hrozí větší riziko znečištění, například od rozstříku maziva. Hlavní využití je tedy především pro menší a středně velké stroje. [1]

2) Horní gántry: Koncept, kdy se v ose X pohybuje pouze příčnick a stojany jsou součástí pevného rámu. Hlavní výhodou je snížení hmoty pohybujících se hmot, větší pracovní výška a

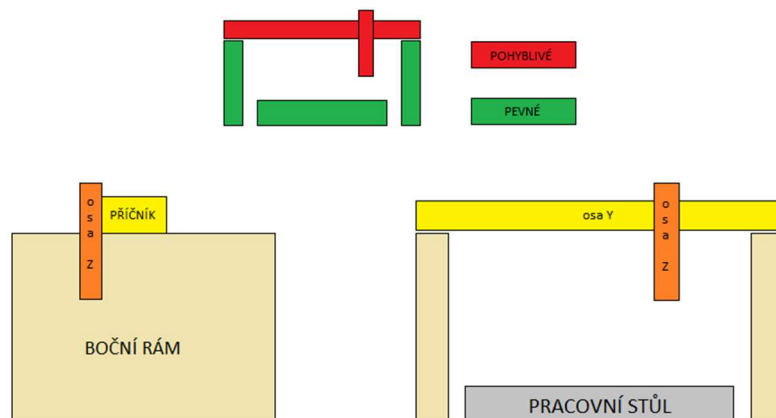
stabilita rámu za cenu většího množství materiálu na sloupech. Přístup ke stroji je pak omezen na přední a horní stranu z důvodu bočního krytování. Celková konstrukce je pak méně kompaktní. Nejčastější uplatnění této varianty je pro větší stroje. [1]

3) Letmo uložené rameno: Oproti portálu má letmo uložené řešení dvě kolejnice na jedné straně. Druhá strana je volná a umožňuje tak výbornou přístupnost k pracovnímu prostoru. Konstrukčně je obecně lehčí než portálová konstrukce, což může vést k nižší pořizovací ceně a menší energetické náročnosti. Nevýhodou může být nižší stabilita, přesnost, větší náchylnost k vibracím a menší rozměry pracovní plochy. Tento typ stroje je ideální pro menší dílny, kde je omezený prostor a je potřeba snadný přístup k řezacímu prostoru

Vzhledem k předpokládanému využití navrhovaného stroje bude nejlepší variantou spodní gántry, především díky kompaktnosti, jednoduchosti, dobré stabilitě a přesnosti výsledného stroje.



Obrázek 12 Spodní gántry



Obrázek 11 Horní gántry



Obrázek 13 Letmo uložené rameno [30]

## 5.3 Volba náhonu

Při volbě vhodného náhonu pro CNC plazmový řezací stoj je důležité znovu zohlednit kritéria, jako jsou přesnost, rychlost, cena a spolehlivost. Mezi nejčastěji používané varianty patří pohybový (kuličkový) šroub a matice, ozubený řemen, pastorek a hřeben (s využitím principu Master - Slave pro bezvůlovost) a lineární elektrický motor. Každá z variant bude nejprve stručně charakterizována a zhodnocena. Z následné analýzy pak bude vyhodnoceno nejlepší řešení pro návrh CNC plazmového řezacího stroje.

1)  $V_1$  - Kuličkový šroub a matice: Mechanismus mění pohyb rotační na lineární užívaný ve dvou provedeních konstrukce. První, při kterém rotuje kuličkový šroub a matice se posouvá, druhé provedení, kdy se zároveň otáčí a posouvá matice, zatímco šroub stojí. Využitím kuliček jakožto valivého elementu dojde k minimalizaci tření, což umožní hladký a přesný pohyb. Mezi hlavní výhody patří možnost vývinu větších posuvových sil, vysoká účinnost, snadná montáž a ekonomická výhodnost pro zdvihy délky až 4 metry. Nevýhodou je zkrucování, ohybové i torzní kmitání při větších délkách, menší styková tuhost a postupná ztráta předpětí. Dále pak omezení posuvové rychlosti na základě délky šroubu, opotřebení zvyšující se s rychlostí a nesamosvornost. [1]

2)  $V_2$  - Ozubený řemen: Flexibilní pás s integrovanými zuby, které se pohybují přes ozubená kola. Poskytují tichý a hladký chod. Výhodou je také velmi dobrá cenová dostupnost a snadná vyměnitelnost. Tento způsob je však méně přesný, je omezen životností a zátěží působící na řemen. Pro správné fungování je nutné řemen udržovat napnutý, což může být problematické u delších vzdáleností a také z tohoto důvodu je potřeba převod častěji servisovat.

3)  $V_3$  - Pastorek a hřeben: Jedná se o jednu z nejvyužívanějších variant náhonu lineárních posuvů CNC strojů. Podstatou je odvalování ozubeného kola, které je spojeno s pohonem, po ozubené liště pevně připevněné ke stroji. Konstrukčně je možné použít šikmé, nebo přímé ozubení. Výhodou je dobrá styková tuhost, snadná údržba, v podstatě neomezená délka zdvihu a nízká hlučnost (především u šikmých zubů). V případě nalisování pastorku na výstupní hřídel motoru je výsledná tuhost do značné míry dána tuhostí motoru. Dále není nutné převod chladit, nedochází ke ztrátě předpětí a lze jej regulovat. Nevýhodou je pracnější výroba, složitější montáž, nesamosvornost a vznik vůlí způsobujících nepřesnost. [1]



Obrázek 14 Náhon maticí a kuličkovým šroubem [1]



Obrázek 15 Náhon Pastorkem a hřebenem [1]

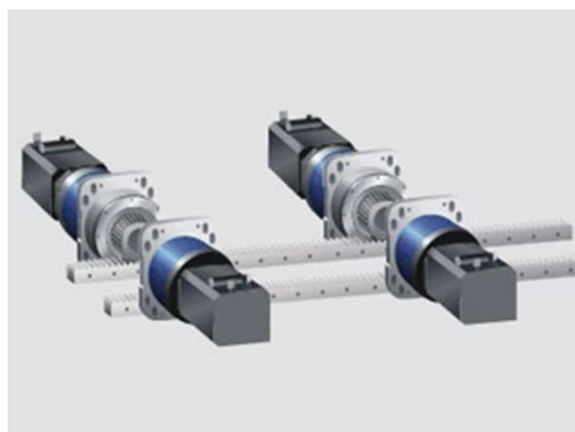
4) V<sub>4</sub> - Lineární motor: Elektromotor, který je konstrukčně uzpůsoben tak, že nemá žádný vložený převod. Posuvová síla vzniká působením elektromagnetických sil. Výhodou je dosažení velkých zrychlení a rychlostí, přesnost, úspora času při častých změnách rychlosti a nízká hluchnost. Nevýhodou je vývin menších posuvových sil, nutnost kvalitnějšího odměřování, přitažlivost magnetických sil do vedení a to i ve vypnutém stavu, nutnost chlazení a havarijních brzd.

Tabulka 5 Vyhodnocení volby náhonu

varianta	hodnocené kritérium					celkem
	nákladnost	životnost	přesnost	nosnost	rychlost	
váha	1,5	2	2	1,5	1	-
V <sub>1</sub>	7	6	8	6	6	53,5
V <sub>2</sub>	<b>9</b>	4	6	4	5	44,5
<b>V<sub>3</sub></b>	<b>2*</b>	<b>9*</b>	<b>9*</b>	<b>8*</b>	<b>7*</b>	<b>58</b>
V <sub>4</sub>	6	7	7	6	<b>9</b>	55

\* při použití systému Master - Slave

Vyhodnocení: po provedení multikriteriální analýzy vychází jako nejlepší varianta náhon pastorkem a ozubeným hřebem. Toto řešení za cenu větších nákladů poskytuje dobrou nosnost, životnost a rychlost. Pro zajištění přesnosti mechanismu je třeba vymezit vůle vznikající mezi motorem a pastorkem, ve spojení pastorku s hřídelí a v samotném kontaktu mezi hřebem a pastorkem. Ideálním řešením tohoto problému je využití schopnosti moderních řídicích systémů – elektronické předeprnutí (Master – Slave). Díky tomu lze dosáhnout pohybu bez nepřesností způsobených vůlemi. [1]



Obrázek 16 Použitý systém Master – Slave [1]

Pro navrhovaný stroj byl zvolen ozubený hřeben s přímým ozubením od firmy APEX DYNAMICS Czech s.r.o. Pro osu X byla vybrána konfigurace s modulem ozubení 2 [mm], šířkou 24 [mm] a délkami 1250 + 1000 [mm]. Pro osu Y pak stejná varianta, pouze s délkou 1250 [mm]. Na základě průměru výstupní hřídele zvoleného pohonu a šířky zubů hřebene bude později navržen pastorek pro obě osy. (Číslo položek: 02061125C00 + 02061000C00). [16]

Pro osu Z zajišťující pohyb plazmového pálicího hořáku, byl zvolen elektrický šroubový pohon s jezdcem od firmy SMC. Konkrétně pak modelová LEFS velikosti 25, s maximálním zdvihem 300 [mm] a v provedení s AC servomotorem. (Číslo položky: LEFS25RA-300). [17]



Obrázek 17 Pohon SMC LEFS [17]

## 5.4 Výpočet pastorku

Výpočet základních parametrů pastorku:

$$d_p = 45 [mm]$$

$$m_p = 2 [mm]$$

$$h_{a0} = 1 [-]$$

$$\alpha = 20 [^\circ]$$

$$\beta = 0 [^\circ]$$

$$\alpha_t = \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}\right) = 0,349 [rad] \quad (1)$$

$$p_t = p_n = \pi \cdot m_p = \pi \cdot 2 = 6,283 [mm] \quad (2)$$

$$z_{min} = \frac{2 \cdot h_{a0}}{(\sin(\alpha))^2} = \frac{2 \cdot 1}{(\sin(20))^2} = 17,097 [-] \quad (3)$$

Na základě vypočteného minimálního počtu zubů, zvoleno:

$$z = 20 [-]$$

$$b_{max} = 1,1 \cdot d_p = 1,1 \cdot 45 = 49,5 [mm] \quad (4)$$

Šířka zubů ozubeného hřebene = 24 [mm]. Za předpokladu větší šířky zubů pastorku volím:

$$b = 30 [mm]$$

$$d_a = d_p + 2 \cdot m_p = 45 + 2 \cdot 2 = 49 [mm] \quad (5)$$

$$d_b = d_p \cdot \cos(\alpha_t) = 45 \cdot \cos(20) = 42,286 [mm] \quad (6)$$

$$d_f = d_p - 2 \cdot (m_p + (0,25 \cdot m_p)) = 45 - 2 \cdot (2 + (0,25 \cdot 2)) = 40 [mm] \quad (7)$$

$$s = \frac{p_t}{2} = \frac{6,283}{2} = 3,142 [mm] \quad (8)$$

Kontrola špičatosti zubů:

$$inv_{\alpha} = \tan(\alpha) - \alpha = \tan(20) - \frac{20 \cdot \pi}{180} = 0,015 [-] \quad (9)$$

$$\alpha_a = \arccos\left(\frac{d_b}{d_a}\right) = \arccos\left(\frac{42,286}{49}\right) = 0,53 [rad] \quad (10)$$

$$inv_{\alpha_a} = \tan(\alpha_a) - \alpha_a = \tan\left(\frac{0,53 \cdot 180}{\pi}\right) - 0,53 = 0,056 [-] \quad (11)$$

$$s_{a\_min} = 0,4 \cdot m_p = 0,4 \cdot 2 = 0,8 [mm] \quad (12)$$

$$x = 0 [mm]$$

$$\begin{aligned} s_{na} &= d_a \cdot \left( \frac{\pi}{2 \cdot z} + \frac{2 \cdot x \cdot \tan(\alpha)}{z} + (inv_{\alpha} - inv_{\alpha_a}) \right) = \\ &= 49 \cdot \left( \frac{\pi}{2 \cdot 20} + \frac{2 \cdot 0 \cdot \tan(20)}{20} + (inv_{\alpha} - inv_{\alpha_a}) \right) = 1,845 [mm] \end{aligned} \quad (13)$$

$$s_{na} \geq s_{a\_min} \quad 1,845 \geq 0,8 \quad \text{PLATÍ, ke špičatosti nedojde}$$

Kde:

$d_p$  – průměr roztečné kružnice pastorku [zvoleno]

$m_p$  – modul ozubení pastorku [určeno modulem ozubeného hřebene]

$h_{a0}$  – součinitel výšky hlavy zubu [zvoleno]

$\alpha$  – záběrový úhel [zvoleno]

$\beta$  – úhel šikmosti zubů [pro přímé ozubení = 0]

$\alpha_t$  – čelní úhel záběru

$p_t$  – čelní rozteč

$p_n$  – normální rozteč

$z_{min}$  – minimální počet zubů, bez vzniku podřezání

$z$  – počet zubů pastorku [zvoleno]

$b_{max}$  – maximální šířka zubů pastorku

$b$  – šířka zubů pastorku [zvoleno]

$d_a$  – průměr hlavové kružnice pastorku

$d_b$  – průměr základní kružnice pastorku

$d_f$  – průměr patní kružnice pastorku

$s$  – tloušťka zubu

$inv_{\alpha}$  – involuta úhlu alfa

$\alpha_a$  – úhel profilu evolventy na hlavové kružnici pastorku

$inv_{\alpha_a}$  – involuta úhlu  $\alpha_a$

$s_{a\_min}$  – minimální tloušťka zubu na hlavové kružnici pastorku

$x$  – jednotkové posunutí [zvoleno]

$s_{na}$  – tloušťka zubu na hlavové kružnici

## 5.5 Výběr typu motoru

Motor je nejdůležitější částí pohybové soustavy obráběcích a pálicích strojů. Správná volba typu a konkrétního modelu pohonu má přímý vliv na kvalitu, efektivitu a ekonomičnost výsledného produktu a celého výrobního procesu. Pro CNC plazmový řezací stroj máme na výběr z několika variant.

1) **Asynchronní motory:** Také známé jako indukční motory, fungují na principu elektromagnetické indukce, kde dochází k otáčení rotoru, který není přímo propojen se střídavým napájecím zdrojem, ale je indukován pomocí magnetického pole. Výhodou je velká odolnost, robustnost a dlouhá životnost, díky jednoduché konstrukci vyžadují méně údržby a jsou cenově dostupné. Mínusem je nižší dosahovaná přesnost a omezené možnosti řízení rychlosti a polohy. [18]

2) **Stejnoseměrné motory:** Pracují na principu přímé konverze elektrické energie na mechanickou energii pomocí komutátoru a kartáčů, které přepínají proud v rotoru. Výhodou je snadné řízení rychlosti a polohy, vysoký krouticí moment při nízkých otáčkách a dobrá přesnost. Z důvodu omezené životnosti a většího opotřebení mechanických částí, hlavně pak kartáčů a komutátoru vyžadují pravidelný servis. Tření mezi kartáči a komutátorem generuje hluk. Komutace také může způsobovat elektromagnetické rušení. Tento problém lze eliminovat volbou moderního BLDC motoru, který již mechanický komutátor neobsahuje. [18]

3) **Servomotory:** Kombinace motoru s polohovou zpětnou vazbou a řídicím systémem poskytuje velmi přesné řízení polohy, rychlosti a točivého momentu. Díky zpětné vazbě dosahují velmi přesného řízení polohy. Rychlá odezva nabízí rychlé změny rychlosti a směru. Poskytují vysoký krouticí moment při různých otáčkách. Záporem je vyšší pořizovací cena a složitější řídicí elektronika. [19]

4) **Krokové motory:** Jak už název napovídá, krokové motory pracují na principu postupného pohybu rotoru v malých krocích, které jsou určovány elektrickými impulsy dodávanými do vinutí motoru. Výhodou je jednoduché řízení, bez potřeby zpětné vazby a nízká cena. Dosahují však nižších krouticích momentů a jejich charakteristiky momentu na otáčkách jsou méně příznivé. Dále mívají větší spotřebu a s tím spojené větší zahřívání. Bez zpětné vazby také může dojít ke ztrátě kroků a tím k nepřesnosti. [19]

**Vyhodnocení:** Po vyhodnocení možných variant řešení pohonu, byl zvolen servomotor. Důvodem je vysoká přesnost, rychlá odezva a schopnost poskytnout vysoký krouticí moment při různých rychlostech. Navzdory vyšším nákladům a složitějšímu řídicímu systému se investice do servomotoru vyplatí, díky jejich výkonu a spolehlivosti, což z nich činí nejlepší volbu pro CNC plazmový řezací stroj. Konkrétní servomotor bude vybrán na základě výpočtů v další části.

## 5.6 Výpočet a výběr servomotoru

Správný výběr a dimenzování servomotoru je zásadní pro zajištění optimálního výkonu, efektivity a životnosti celého systému. Na základě několika vstupních parametrů budou v této části bakalářské práce nejdříve spočítány základní požadavky a následně vybrán vhodný pohon pro pohyb portálu v ose X. [1]

Zvolené a zadané parametry:

$$\begin{aligned}
 r_a &= \frac{d_a}{2} = \frac{49}{2} = 24,5 \text{ [mm]} \\
 m_{\text{pastorek}} &= 0,35 \text{ [kg]} \\
 r_{\text{hřidel}} &= 7 \text{ [mm]} \\
 f_v &= 0,06 \text{ [-]} \\
 g &= 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \\
 v_{rp} &= 75\,000 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] = 1,25 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \\
 a_{\text{max}} &= 3,5 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]
 \end{aligned} \tag{14}$$

Kde:

$r_a$  – poloměr roztečné kružnice pastorku

$m_{\text{pastorek}}$  – hmotnost pastorku [změřeno v SolidWorks 2023]

$r_{\text{hřidel}}$  – poloměr výstupní hřídele zvoleného servomotoru [katalog]

$f_v$  – třecí součinitel ve vedení [zvoleno]

$g$  – tíhové (gravitační) zrychlení

$v_{rp}$  – maximální rychlost (rychloposuv) [zvoleno]

$a_{\text{max}}$  – maximální předpokládané zrychlení [zvoleno]

Zvolený pastorek bude nalisován přímo na výstupní hřídel servomotoru, proto:

$$i_p = 1 \text{ [-]}$$

$$\eta_p = 1 \text{ [-]}$$

$$\eta_o = 1 \text{ [-]}$$

Přepočítání odhadované zátěže na 1 pár motorů (Master + Slave):

$$m_{\text{PORTÁL}} = 40 \text{ [kg]}$$

$$i_x = 2 \text{ [-]}$$

$$m_z = \frac{m_{\text{PORTÁL}}}{i_x} = \frac{40}{2} = 20 \text{ [kg]} \tag{15}$$

Kde:

$i_p$  – převodový poměr vložené převodovky [zvoleno – bez vložené převodovky]

$\eta_p$  – účinnost vložené převodovky [zvoleno – bez vložené převodovky]

$\eta_o$  – účinnost vloženého převodu [zvoleno – bez vloženého převodu]

$m_{\text{portál}}$  – předpokládaná celková hmotnost portálu [zvoleno]

$i_x$  – počet pohybových jednotek osy x (pohon na obou stranách portálu) [zvoleno]

$m_z$  – předpokládaná hmotnost působící na 1 pár motorů (Slave + Master)

Statické hledisko – Zabývá se situací, kdy se neberou v úvahu dynamické síly, ale pouze síly působící na těleso v klidu, nebo rovnoměrném pohybu. Na rozdíl od obrábění, při plazmovém řezání nedochází k úběru materiálu mechanicky, proto lze předpokládat, že by statické hledisko odpovídalo pouze velikosti momentu předpětí pohonů v režimu Master - Slave. Dynamické hledisko nicméně bude daleko větší a pohon je třeba dimenzovat podle něj.

Kinematické hledisko:

$$S_c = \frac{v_{rp}^2}{a_{max}} = \frac{1,25^2}{3,5} = 0,446 [m] = 446 [mm] \quad (16)$$

$$t_{rp} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_c}{a_{max}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,446}{3,5}} = 0,714 [s] \quad (17)$$

Kde:

$S_c$  – dráha rozběhu na maximální rychlost (rychloposuv)

$t_{rp}$  – čas rozběhu na maximální rychlost (rychloposuv)

Dynamické hledisko:

$$J_{mot} = 0,151 [kg \cdot cm^2]$$

$$J_{br} = 0,01 [kg \cdot cm^2]$$

$$J_p = 0 [kg \cdot m^2]$$

$$J_1 = \frac{1}{2} \cdot m_{pastorek} \cdot (r_a^2 - r_{hridel}^2) = \frac{1}{2} \cdot 0,35 \cdot (2,45^2 - 0,7^2) = 0,965 [kg \cdot cm^2] \quad (18)$$

$$\begin{aligned} J_{rhm} &= J_{mot} + J_{br} + J_p + \frac{J_1}{i_p} + \frac{m_z \cdot r_a^2}{i_p^2} = \\ &= 0,151 + 0,01 + 0 + \frac{0,965}{1^2} + \frac{20 \cdot 2,45^2}{1^2} = 121,176 [kg \cdot cm^2] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\varepsilon_p = \frac{a_{max}}{r_a} = \frac{3,5}{0,0245} = 142,857 \left[ \frac{rad}{s^2} \right] \quad (20)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p \cdot i_p = 142,857 \cdot 1 = 142,857 \left[ \frac{rad}{s^2} \right]$$

$$\begin{aligned} M_{md} &= J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + \frac{m_z \cdot g \cdot f_v \cdot r_a}{\eta_p \cdot \eta_o \cdot i_p} = \\ &= 0,01212 \cdot 142,857 + \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 0,06 \cdot 0,0245}{1 \cdot 1 \cdot 1} = 2,019 [N \cdot m] \end{aligned} \quad (21)$$

Kde:

$J_{mot}$  – moment setrvačnosti motoru [katalog]

$J_{br}$  – moment setrvačnosti brzdy [katalog]

$J_p$  – moment setrvačnosti vložené převodovky [zvoleno – bez vložené převodovky]

$J_1$  – moment setrvačnosti pastorku

$J_{rhm}$  – moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru

$\varepsilon_p$  – úhlové zrychlené pastorku

$\varepsilon_m$  – úhlové zrychlené motoru

$M_{md}$  – dynamický moment motoru

Výše uvedené výpočty uvažují pouze s jedním náhonovým motorem. U způsobu náhonu pracující v režimu Master – Slave lze dle výše uvedených vztahů pro dynamický moment uvažovat 0,65 násobek vypočítaného momentu pro motor Master a také 0,65 pro motor Slave. [1]

$$M_{dyn} = 0,65 \cdot M_{md} = 0,65 \cdot 2,019 = 1,313 [Nm] \quad (22)$$

Požadovaný výkon:

$$P_1 = F \cdot v_{rp} = m_z \cdot a_{max} \cdot v_{rp} = 20 \cdot 3,5 \cdot 1,25 = 87,5 [W] \quad (23)$$

$$P_{teor} = 0,65 \cdot P_1 = 0,65 \cdot 87,5 = 56,875 [W] \quad (24)$$

Otáčky motoru při rychloposuvu:

$$n_{rp} = \frac{v_{rp}}{o_p} = \frac{v_{rp}}{\pi \cdot d_p} = \frac{1,25}{\pi \cdot 0,045} = 8,842 [s^{-1}] = 530,516 [min^{-1}] \quad (25)$$

Rychlost pastorku při nominálních a maximálních otáčkách motoru:

$$v_{nom} = o_p \cdot n_{nom} = \pi \cdot d_p \cdot n_{nom} = \pi \cdot 0,045 \cdot \frac{1000}{60} = 2,356 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (26)$$

$$v_{max} = o_p \cdot n_{max} = \pi \cdot d_p \cdot n_{max} = \pi \cdot 0,045 \cdot \frac{2820}{60} = 6,644 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (27)$$

Vybraný servomotor: Kollmorgen – AKM22C (120 Vac)

Kontrola parametrů:

$$M_{dyn} = 1,313 [Nm] \quad M_{nom} = 0,84 [Nm] \quad M_{max} = 2,39 [Nm] \quad \text{VYHOVUJE}^*$$

$$n_{rp} = 530,516 [min^{-1}] \quad n_{nom} = 1000 [min^{-1}] \quad n_{max} = 2820 [min^{-1}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$P_{teor} = 56,875 [W] \quad P_{motoru} = 90 [W] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$v_{rp} = 1,25 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad v_{nom} = 2,356 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad v_{max} = 6,644 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Kde:

$M_{md}$  – dynamický moment motoru

$M_{dyn}$  – skutečný požadovaný krouticí moment na jeden motor

$M_{nom}$  – nominální krouticí moment zvoleného servomotoru [katalog]

$M_{max}$  – maximální krouticí moment zvoleného servomotoru [katalog]

$P_1$  – minimální požadovaný výkon pro jeden pár servomotorů

$P_{teor}$  – teoretický požadovaný výkon pro jeden servomotor

$P_{motoru}$  – výkon zvoleného servomotoru [katalog]

$n_{rp}$  – otáčky motoru při rychloposuvu

$n_{nom}$  – nominální otáčky zvoleného servomotoru [katalog]

$n_{max}$  – maximální otáčky zvoleného servomotoru [katalog]

$v_{rp}$  – maximální rychlost (rychloposuv) [zvoleno]

$v_{nom}$  – rychlost při nominálních otáčkách zvoleného servomotoru

$v_{max}$  – rychlost při maximálních otáčkách zvoleného servomotoru

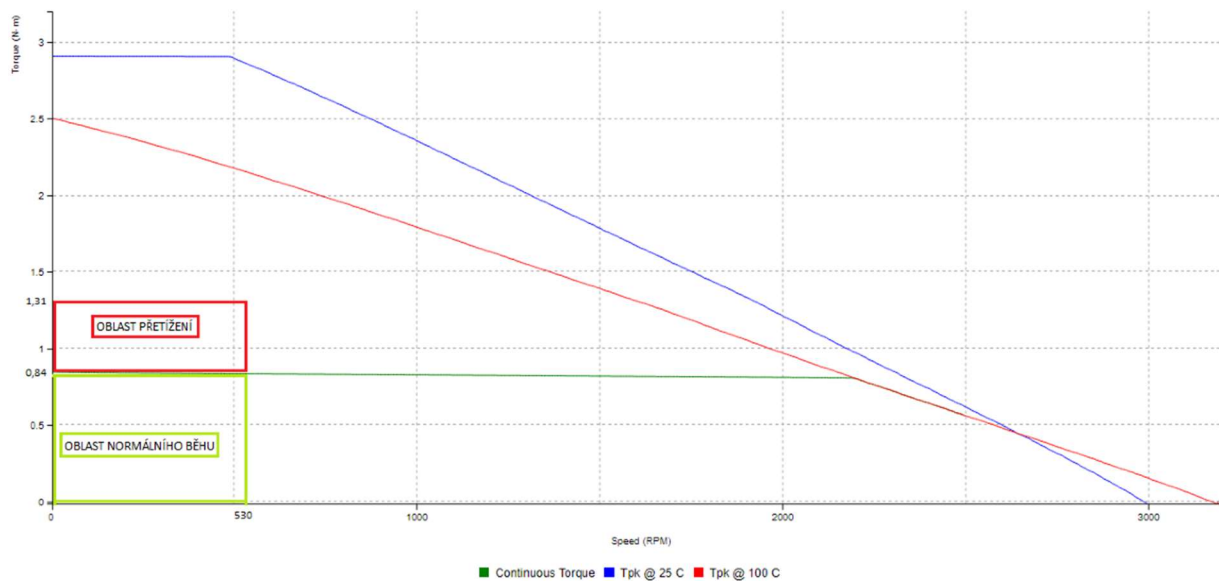
$o_p$  – obvod roztečné kružnice pastorku

Z výše uvedeného srovnání je zřejmé, že zvolený servomotor Kollmorgen – AKM22C (120 Vac) je ideální volbou pro požadované parametry. Motor má dostatečnou výkonnostní rezervu, potřebnou k pokrytí zanedbaných ztrát (odpory kabelů, hadic a energetických řetězců) a také poskytuje potenciál další modifikace a vylepšení plazmového řezacího stroje. [20] [21]



Obrázek 18 Servomotor Kollmorgen AKM22C [20]

\*Kroučící dynamický moment je sice větší než nominální kroučící moment zvoleného motoru, ale za předpokladu krátkodobého přetížení (které nastane pouze v případě rozjezdu z klidu na rychlost rychloposuvu – předpokládána malá četnost), bohatě postačuje maximální kroučící moment servomotoru. Toto řešení je také ekonomičtější, než dimenzování dle nominálního kroučícího momentu motoru.



Obrázek 19 Výkonnostní graf s vyznačením oblastí normálního běhu a přetížení [20]

## 5.7 Výběr lineárního vedení

Lineární vedení zajišťuje přesné vedení portálové konstrukce po osách X a Y. Využitím vhodného typu vedení lze minimalizovat třecí síly, snížit tak zátěž na pohon. Při výběru je hlavním kritériem nosnost, tuhost, požadovaná rychlost a zrychlení, vysoká životnost, spolehlivost, snadná montáž a údržba. Na základě těchto kritérií byla vybrána kombinace lineárních kuličkových vozíků a kolejnic od firmy HIWIN s.r.o, z Brna. Konkrétně pak kuličkové vozíky HGH20HA, které budou z důvodu lepšího rozložení zátěže a eliminace naklápění vždy použity v páru. Kompatibilní kolejnicí je model HGR20R . [22]

Hrubý odhad životnosti vozíků:

$$i_v = 4[-]$$

$$m_{1v} = \frac{m_{PORTÁL}}{i_v} = \frac{40}{4} = 10 [kg] \quad (28)$$

$$L = \left(\frac{C_{dyn}}{P}\right)^3 \cdot 50 km = \left(\frac{C_{dyn}}{m_{1v} \cdot g}\right)^3 \cdot 50 km = \left(\frac{32700}{10 \cdot 9,81}\right)^3 \cdot 50 km = 1,852 \cdot 10^9 [km] \quad (29)$$

$$L_h = \frac{L}{v_{rp}} = \frac{\left(\frac{C_{dyn}}{P}\right)^3 \cdot 50000}{v_{rp}} = \frac{\left(\frac{32700}{10 \cdot 9,81}\right)^3 \cdot 50000}{1,25 \cdot 3600} = 4,115 \cdot 10^9 [hod] \quad (30)$$

Kde:

$i_v$  – počet lineárních kuličkových vozíků pro osu X [zvoleno]

$m_{1v}$  – hmotnost působící na jeden lineární kuličkový vozík

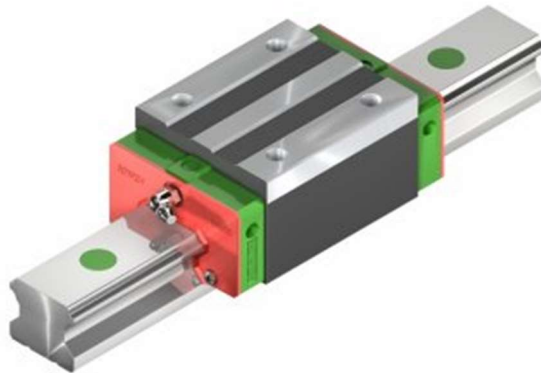
$C_{dyn}$  – dynamická únosnost zvoleného vozíku

$P$  – ekvivalentní dynamické zatížení

$L$  – jmenovitá životnost zvolených vozíků v kilometrech

$L_h$  – životnost zvolených vozíků v hodinách

Z vypočtených hodnot lze konstatovat, že zvolené vozíky i po započtení dalších faktorů (faktor tvrdosti, teploty a zátěže) bez problému splní požadované parametry. Výpočet je pouze orientační a uvažuje pouze s hmotnostmi, nikoliv reakčními silami. Při zrychlování bude portál působit na vozíky většími silami. Reálná životnost tedy bude nižší, ale i přes tuto skutečnost několikanásobně překoná životnost celého stroje.



Obrázek 20 Zvolený lineární kuličkový vozík a kolejnice [22]

## 5.8 Výpočet průhybu nosníku portálu

$$m_{pn} = 25 \text{ [kg]}$$

$$L_{nosn} = 1265 \text{ [mm]}$$

$$E = 210 \text{ [GPa]}$$

$$I_{zz} = 11,35 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$F_G = m_{pn} \cdot g = 25 \cdot 9,81 = 245,25 \text{ [N]} \quad (31)$$

$$w_{max} = \frac{F_G \cdot L_{nosn}^3}{48 \cdot E \cdot I_{zz}} = \frac{245,25 \cdot 1,265^3}{48 \cdot (210 \cdot 10^9) \cdot (11,35 \cdot 10^{-8})} = 4,339 \cdot 10^{-4} \text{ [m]} = 0,4339 \text{ [mm]} \quad (32)$$

Kde:

$m_{pn}$  – hmotnost součástí zatěžující nosník portálu [změřeno v SolidWorks 2023]

$L_{nosn}$  – délka nosníku mezi středy sloupů [změřeno v SolidWorks 2023]

$E$  - Youngův modul pružnosti

$I_{zz}$  – kvadratický moment průřezu [Feron]

$F_G$  – tíhová (gravitační) síla zatěžující nosník

$w_{max}$  – maximální průhyb nosníku

Maximální průhyb nosníku vyšel 0,4339 [mm], což je přijatelná hodnota. Plazmové řezací stroje navíc díky ovládacímu systému aktivně hlídají vzdálenost hořáku od páleného materiálu. V žádném případě by tedy nemělo dojít ke kolizi z důvodu přetížení nosníku portálové konstrukce. Výpočet je pouze informativní.

## 5.9 Výběr plazmové řezací hlavy

Dle požadovaných specifikací byla vybrána řezací hlava STAHLWERK P80 CNC. Jedná se o kvalitní hořák vyrobený z nerezové oceli, s pilotním zapalováním, pro plazmové řezací stroje. Model je vhodný pro CNC stroje s vertikálním uchycením pálicí hlavy. Konstrukce hořáku umožňuje snadnou montáž. Vybraný produkt obsahuje plazmovou elektrodu, trysku, keramické krytky a vysoce kvalitní mosaznou hlavu. Opotřeбенé díly lze v několika jednoduchých a rychlých krocích vyměnit. Příznivá pořizovací cena, výborná odolnost a spolehlivost, splňují stanovené požadavky. [23]



Obrázek 21 Řezací hlava STAHLWERK P80 CNC [23]

## 5.10 Výběr plazmového řezacího zdroje

Hypertherm Powermax105 SYNC je profesionální řezací stroj nové generace, který významně zjednodušuje provoz systému pro drážkování a řezání do doporučené tloušťky cca 32 [mm]. Nabízí automatizované nastavení procesu plazmového řezání. Maximalizace produktivity díky snížení prostojů, optimalizování kvality řezu a jednoduchost obsluhy poskytují výborné výsledky. [24]



Obrázek 22 Hypertherm Powermax105 SYNC [24]

## 5.11 Zhodnocení

Díky vybraným komponentám lze u navrženého stroje předpokládat efektivní řezání s dobrou kvalitou řezu pro ocelové materiály do tloušťky 30 [mm]. Vhodná řezná rychlost je závislá na tloušťce děleného materiálu. Pro tloušťku 32 [mm] výrobce zdroje doporučuje rychlost 500 [mm/min]. Pro tenčí plechy však bude tato hodnota vyšší.

Ostatní zvolené prvky zajistí bezpečný, spolehlivý a efektivní chod, bez výrazné potřeby servisu.

## 6. BEZBEČNOSTNÍ A OSTATNÍ PRVKY

Tato kapitola je zaměřena na prvky, zaručující bezpečný provoz navrhovaného plazmového řezacího stroje. Při provozu je důležité dbát na bezpečnost obsluhy stroje, ale také předejít poškození důležitých částí stroje. V době stále se zvyšujících bezpečnostních standardů, je velmi obtížné eliminovat všechny hrozby, především díky "lidskému faktoru". I na sebebezpečnějším stroji může dojít k pracovnímu úrazu. Proto je nezbytné důkladné a opakované proškolení zaměstnanců. Níže popsané bezpečnostní prvky jsou tedy spíše chápány jako nezbytné minimum pro provoz stroje.

## 6.1 Energetické řetězy

Energetické řetězy jsou klíčovým prvkem v moderních průmyslových aplikacích. Hlavní funkcí energetických řetězů je bezpečné vedení a ochrana kabelů a hadic u pohyblivých strojů. Při volbě správného řetězu je nutné správně určit vnitřní prostor, kterým je vedeno vše potřebné pro správné fungování stroje. Dalším důležitým faktorem je minimální poloměr ohybu, který se ale většinou odvíjí od náplně energetického řetězu. Dle rizik pracovního prostředí je také možné vybírat z mnoha konstrukčních provedení. Dobré je také zvolit samozhášecí materiál, který zabrání požáru. Pro navrhovaný plazmový řezací stroj byly zvoleny řetězy od výrobce JFLO, konkrétně typ 18BF02.37 R38. Poloměr ohybu po montáži dle konstrukce vychází na 55 [mm], což je dostačující pro tuto aplikaci. [25]



Obrázek 23 Energetický řetěz [25]

## 6.2 Krytí pastorků

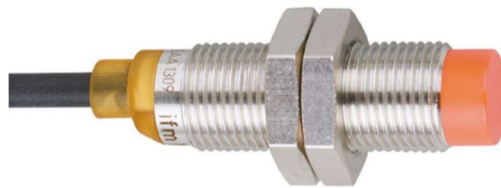
Rotující a pohyblivé prvky vždy představují velké bezpečnostní riziko pro obsluhu stroje. Především pak ozubení pastorku a hřebene může způsobit závažné zranění. Jednoduché zakrytí tuto možnost minimalizuje. Vhodnější možností je krytí vedení a hřebenů měchovým krytem ze samozhášivého materiálu. Z důvodu omezeného prostoru a případnému složitějšímu aplikování pro parametry navrhovaného stroje tato možnost nebyla využita.

## 6.3 Uchycení plazmové řezací hlavy

Plazmová řezací hlava se během procesu pálení pohybuje velmi blízko materiálu. Ovládací systém sice hlídá tuto vzdálenost, ale i tak může dojít k celé řadě nepředvídatelných situací. Deformace a velké nerovnosti plechu, ale i částečné propadnutí výpalku, při kterém zůstanou části materiálu výrazně vyčnívat nad plochu pracovního stolu, mohou způsobit velké problémy. V případě kontaktu s plechem může dojít ke kolizi, kterou je potřeba efektivně a rychle vyřešit. Konstrukčně složitější možností je odpružení plazmového hořáku, nevýhodou je složitý návrat do původní polohy a zaručení přesnosti následujících operací. Jednoduchou a zároveň elegantní možností je vyrobení uchycení z materiálu, který vydrží běžné operace stroje, ale při větší zátěži rázového typu praskne (nebo deformuje), uvolní plazmový hořák a zabrání tak jeho většímu poškození. Tato část je považována za spotřební materiál a bude třeba doplňovat, například 3D tiskem. Za pomoci senzorů pak zbývá pouze zajistit, aby v tomto kritickém momentu byla pálcí jednotka co nejrychleji odpojena.

## 6.4 Induktivní senzory

Lineární vedení je potřeba zajistit koncovými body. Po startu stroj najede do referenčních poloh, aby došlo ke korekci polohy. Následně se již poloha odečítá z pohybu motorů. Při běhu sice stroj ví, kde se nachází a kde jsou jeho krajní polohy, ale pro větší spolehlivost je vhodné konce osy X a Y opatřit senzory. Vhodným produktem je induktivní senzor IFS257 od firmy IFM. Spínací vzdálenost tohoto modelu je cca 7 [mm], výrobce jej doporučuje pro použití v průmyslových aplikacích. Další výhodou je vysoký stupeň krytí, který umožní použití v náročných podmínkách. Bezpečné rozpoznání objektu díky velké snímací vzdálenosti a nízké toleranci senzoru zamezí nežádoucím kolizím. [26]



Obrázek 24 Induktivní senzor IFS257 [26]

## 6.5 Mechanické koncové body

I přes elektronické zabezpečení, je dobré využít i mechanických koncových bodů. Jednoduchý plastový díl, připevněný na kolejnici lineárního vedení je záruka bezpečnosti i v případech, kdy selže ovládací systém.

## 6.6 Emergency STOP tlačítko

V mnoha případech je důležité okamžité přerušování výrobního procesu. Obsluha stroje by vždy měla mít možnost okamžitě odstavit pracující stroj. Jednoduché a lete ověřené STOP tlačítko umožní zaměstnanci okamžité nouzové zastavení. Při umísťování těchto tlačítek je nutné zajistit co nejlepší přístupnost, ale zároveň vytipovat místo, kde nebude docházet k nechtěnému kontaktu.

## 6.7 Ovládací systém

Ovládací systém je nejdůležitějším prvkem stroje. Správné řízení všech procesů celého stroje je podmíněno výběrem správného softwaru a hardwaru. Kromě pohybu v osách X, Y a Z v manuálním nebo automatickém režimu podle předem definovaného programu, musí stroj během pálicího procesu aktivně hlídat vzdálenost mezi pálicí hlavou a plechem. Plechové hutní polotovary nikdy nejsou ideálně rovné. Nejlepší volbou je použití technologie THC (Torch Height Control), která snímá úbytek napětí mezi hořákem a opracovávaným materiálem. Na základě měřeného napětí systém automaticky upravuje výšku hořáku tak, aby udržoval konstantní vzdálenost od materiálu. Tím se kompenzují nerovnosti a deformace způsobené tepelným působením plazmy. Před začátkem řezacího cyklu je vždy nutné provést dotyk hlavy s opracovávaným materiálem, aby se určila jeho tloušťka a mohla se tak vypočítat správná poloha hořáku v ose Z. Použitím Ohmic - touch senzoru dojde při dotyku ke spojení obvodu a tím pádem k výškové referenci materiálu. Po získání potřebných informací může pálicí hlava odjet do požadované polohy a začít pálicí proces. [27]

## 7. CENOVÝ ODHAD NAVRŽENÉHO STROJE

Výsledná cena je důležitým aspektem navrženého stroje. Efektivní snížení výrobních nákladů je klíčové pro zajištění konkurenceschopnosti produktu na trhu, což také umožňuje stanovení adekvátní prodejní marže, která je důležitá pro udržení ziskovosti. Při posuzování celkových nákladů je důležité zohlednit nejen náklad na materiál a výrobu, ale také náklady na vývoj, logistiku, marketing a prodej. Následující cenový odhad poskytuje hrubou představu o výrobní ceně, což je nezbytné pro další plánování a finanční analýzu.

Tabulka 6 Cenový odhad navrženého stroje

položka	cena [kus/m]	počet	celkem
hutní polotovary (normalizované jakly, profily, tyče, plechy, ...)	50 000 [Kč]	1 [-]	50 000 [Kč]
ozubený hřeben APEX DYNAMICS (02061250C00 +02061000C00)	2 500 [Kč/m]	6 [m]	15 000 [Kč]
pastorek	2 000 [Kč]	6 [ks]	12 000 [Kč]
kolejnice HIWIN HGR20R	2 000 [Kč/m]	6 [m]	12 000 [Kč]
kuličkový vozík HIWIN HGH20HA	1 500 [Kč]	8 [ks]	12 000 [Kč]
elektrický šroubový pohon SMC LEFS25RA-300	15 000 [Kč]	1 [ks]	15 000 [Kč]
servomotor Kollmorgen AKM22C	15 000 [Kč]	6 [ks]	90 000 [Kč]
zdroj Hypertherm Powermax105 SYNC	175 000 [Kč]	1 [ks]	175 000 [Kč]
plazmový hořák STAHLWERK P80 CNC	2 500 [Kč]	1 [ks]	2 500 [Kč]
energetický řetěz JFLO 18BF02.37 R38	600 [Kč/m]	8 [m]	4 800 [Kč]
induktivní senzory IFM IFS257	1 500 [Kč]	6 [ks]	9 000 [Kč]
spojovací materiál	5 000 [Kč]	1 [-]	5 000 [Kč]
řídící systém (např. Sinumerik, měniče, zdroje, jištění, ...)	80 000 [Kč]	1 [-]	80 000 [Kč]
ostatní (obráběné díly, uchycení, kabely, hadice, bezpečnostní prvky, montáž, seřízení...)	100 000 [Kč]	1 [-]	100 000 [Kč]
<b>CELKEM</b>			<b>582 300 [Kč]</b>

## 8. ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ PRO PRAXI

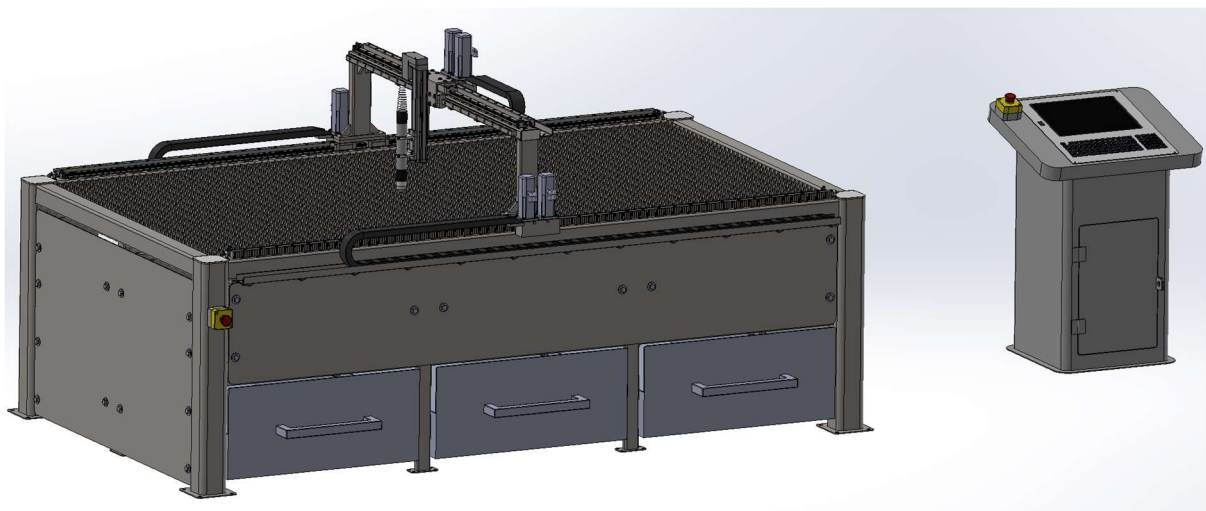
Konstrukční návrh CNC plazmového řezacího stroje vyhovuje vytyčeným cílům a lze jej využít pro případnou realizaci. Navržený stroj umožňuje řezat ocelové plechy o rozměrech 1000 x 2000 [mm] a tloušťkách až 30 [mm]. Přesnost stroje je díky zvolené metodě náhonu omezena pouze přesností odměřování a zvoleným pohonem pro osu Z. Lze tedy předpokládat, že navržený stroj požadované hodnoty splní. Díky vhodně zvoleným komponentám, masivní konstrukci a bezpečnostním prvkům byl vytvořen spolehlivý, výkonný prototyp s dlouhou životností. Nakupované prvky byly vybrány z nabídky kvalitních, spolehlivých a ověřených dodavatelů.

Pro pohyb stroje v osách X a Y je zvolena kombinace ozubeného pastorku s hřebenem a kuličkového lineárního vedení zajišťující bezproblémový chod stroje. Osa Z je ovládána elektrickým šroubovým pohonem, poskytující požadované parametry pro pohyb pálicího hořáku. Zvolená pálicí hlava, zdroj a ostatní bezpečnostní prvky jsou voleny na základě zadaných parametrů, které splňují. Samotná konstrukce stroje pak poskytuje dostatečnou tuhost a stabilitu, zajišťující přesné polohování a fungování stroje.

Výpočty motoru a lineárního vedení jsou vztahovány na osu X. Pro osu Y je předpokládáno nižší zatížení, tudíž se zde nabízí možnost volby jiných, méně výkonných servomotorů. V rámci unifikace bylo zvoleno stejné řešení, ale případně lze postupovat obdobně jako při volbě pro osu X.

Možnost vylepšení se jeví především v použití silnějšího plazmového zdroje s adekvátním hořákem. Dosahovaná tloušťka materiálu je však dostačující pro většinu aplikací ve strojírenství a při náročnějších požadavcích je vhodné zvážit, zda je stále výhodné uvažovat o technologii plazmového řezání. V případě menších výkonnostních, nebo spolehlivostních požadavků lze nahradit nejdražší položky (zdroj, servomotory, ...) levnější alternativou, běžně dostupnou z internetových e-shopů jako jsou Amazon, eBay, AliExpress a další. Zde je však potřeba počítat s často nižší kvalitou zpracování a spolehlivostí zvoleného produktu.

Hrubá odhadovaná cena výroby vyšla na cca 582 300 Kč. Jak již bylo dříve zmíněno, do této částky není započítána například logistika a vývoj. I přes další položky zvyšující finální cenu je však výsledný návrh dobrou alternativou CNC plazmových strojů od předních světových výrobců. Největší význam má tedy pro menší firmu, která si tento stroj sama zvládne vyrobit.



Obrázek 25 Navržený plazmový řezací stroj

## 9. ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést rozbor současného stavu vědy a techniky u problematiky plazmových řezacích strojů. Dále navrhnout varianty a zdůvodnit výběr konkrétního řešení. Následně konstrukčně zpracovat zvolenou variantu do 3D modelové sestavy. Vybrané prvky zkontrolovat pomocí výpočtů nezbytných pro návrh a dimenzování stroje. Závěrem pak zhodnotit dosažené výsledky a zahrnout doporučení pro praxi. Zadaných cílů bakalářské práce bylo docíleno.

Práce obsahuje několik částí:

První, rešeršní část, se zabývá technologií a principy procesu plazmového řezání. Úvodem je vysvětlena fyzikální podstata plazmy, dále jsou přiblíženy používané plazmové, fokusační a asistentní plyny. Následuje doporučení jejich kombinace na základě tloušťky a druhu řezaného materiálu. Na kapitulu hodnotící výhody a nevýhody řezání plazmovým paprskem navazují další způsoby využití této technologie ve strojírenství. Porovnání s dalšími metodami řezání materiálu, jako jsou autogen, laser a vodní paprsek umožnilo blíže specifikovat požadované parametry navrhovaného stroje. Průzkum trhu v oblasti plazmových řezacích strojů nabídl inspiraci pro vlastní konstrukční zpracování. Závěrem první části bakalářské práce jsou stanoveny požadavky a kritéria nezbytná pro vlastní návrh plazmového řezacího stroje.

Druhá, konstrukční část nejdříve vybírá z možností sestavení nosné konstrukce stroje. Zvolena byla varianta využití normalizovaných hutních polotovarů. Pro sestavení výsledného modelu bylo využito čtvercových a obdélníkových uzavřených profilů, plechů a tyčí od firmy Feron. Jako konstrukčně nejlepší bylo zvoleno provedení spodní gántry. Při volbě typu náhonu na základě multikriteriální analýzy dopadla nejlépe kombinace ozubeného hřebene a pastorku pro osy X a Y. Pro hřebeny od firmy APEX DYNAMICS byl následně navržen a spočítán vhodný pastorek. Pro osu Z byl zvolen vyhovující elektropohon od firmy SMC. Následuje volba typu motoru, která je zakončena výběrem servomotorů Kollmorgen AKM22C. Dle technických výpočtů a výkonnostního grafu byla ověřena správnost této volby. Nakonec bylo vybráno lineární kuličkové vedení od firmy HIWIN, plazmová řezací hlava STAHLWERK P80 CNC, zdroj Powermax105 SYNC vyráběný firmou Hypertherm a další bezpečnostní prvky, jako například energetické řetězy, uchycení plazmové řezací hlavy a indukční senzory.

Třetí, závěrečná část obsahuje hrubý cenový odhad navrženého stroje, zhodnocení dosažených výsledků, možnosti vylepšení a doporučení pro praxi.

Součástí práce je také seznam příloh obsahující kompletní 3D sestavu navrženého stroje a výkresovou dokumentaci hlavní sestavy, podsestavy portálové konstrukce, výkres svaření a obrobení portálu a výrobní výkresy spojovacího plechu motoru a zvoleného pastorku.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, Jiří a kolektiv. Stavba a provoz CNC obráběcích strojů [online]. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, VUT v Brně, FSI, Technická 2896/2, 616 69 Brno.: MM publishing, 2023 [cit. 2024-05-20]. ISBN 978-80-907452-4-7. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz/StavbaAProvoz/ev-1>.
- [2] How a Plasma Cutter Works. Lincoln Electric [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/welding-and-cutting-resource-center/plasma-cutting-resource-center/process-and-theory/how-a-plasma-cutter-works>
- [3] VELLING, Andreas. How Plasma Cutting Works? Advantages & Disadvantages. Fractory.com [online]. 2021 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://fractory.com/plasma-cutting/>
- [4] Obrábění plazmou. Technický týdeník [online]. 2015 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou\\_29259.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou_29259.html)
- [5] BOC. Facts about plasma technology and plasma cutting [online]. 2018 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: [https://www.boc-gas.co.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology\\_tcm435-68107.pdf](https://www.boc-gas.co.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology_tcm435-68107.pdf)
- [6] Srovnání CNC technologií pro řezání oceli. MM Průmyslové spektrum [online]. 2023, 2023(4), 4 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/srovnani-cnc-technologiei-pro-rezani-oceli>
- [7] Nekonvenční metody obrábění – 8. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, 2008(10), 7 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>
- [8] Autogen, plazma či laser? MM Průmyslové spektrum [online]. 2018, 2018(1,2), 4 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/autogen-plazma-ci-laser>
- [9] Možné dělení typů a druhů laserů. Leonardo technology [online]. s. 5 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [10] Řezání vodním paprskem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, 2008(7,8), 3 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem2>
- [11] Pálicí stroj Vanad KOMPAKT [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/palici-stroje/nabidka-stroju/vanad-kompakt>
- [12] RAPTOR TECHNOLOGIES. CNC PLAZMA [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.raptor-cnc.com/cnc-plazma.html>
- [13] LINCOLN ELECTRIC. Torchmate X [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://torchmate.com/torchmate-x>
- [14] ITEM 24. Stavebnicový systém MB [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://cz-product.item24.com/cs/katalog/products/mb-building-kit-system-1001009411/>
- [15] Feron [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>

- [16] APEX DYNAMICS CZECH. Racks with Straight Teeth [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/en/produkty/hrebeny-prime-ozubeni/>
- [17] SMC. Elektrický šroubový pohon s jezdcem [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/lefs-lekfs~133884~nav?productId=133890&partNumber=LEFS25LS2A-200B-S2A21>
- [18] E-KONSTRUKTER. Jaký je rozdíl mezi AC, DC a EC motory? [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-ac-dc-a-ec-motory>
- [19] WEVOLLER. Stepper vs Servo Motors: What's the Difference? [online]. 2023 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/stepper-vs-servo-motors-a-comprehensive-comparison-for-your-next-project>
- [20] KOLLMORGEN. Product selectors [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.kollmorgen.com/en-us/service-and-support/technical/product-selectors>
- [21] RAVEO. Kollmorgen AKM selection guide [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: [https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/02/katalog\\_kollmorgen\\_akm\\_selection\\_guide\\_2014\\_en.pdf](https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/02/katalog_kollmorgen_akm_selection_guide_2014_en.pdf)
- [22] HIWIN. Kuličkové lineární vedení řada HG/QH [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-hg-qh>
- [23] STAHLWERK. STAHLWERK P80 CNC [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.stahlwerk-schweissgeraete.de/zubehoer-cut-plasmaschneidbrenner-p-80-cnc-edelstahl-cz>
- [24] HYPER THERM. Powermax105 SYNC plasma cutter [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/hypertherm/powermax/powermax105-sync/>
- [25] CNC SHOP. Energetický řetěz 18BF02 [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.cncshop.cz/energeticky-retez-18bf02/pro1519.html>
- [26] IFM. Induktivní senzor IFS257 [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/product/IFS257?tab=details>
- [27] Řízení CNC plazmové řezačky - MyPlasm CNC [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=tiiDVh2t-Cs>
- [28] Matfyz.cz [online]. 2019 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/tresky-blesky>
- [29] FRACTORY.COM. Waterjet Cutting [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://fractory.com/waterjet-cutting-explained/>
- [30] INDIAMART. CNC Plasma Cutting Machine [online]. [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/esab-ipcm-cantilever-type-cnc-oxyfuel-plasma-cutting-machine-2853629266055.html>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, TABULEK A OBRÁZKŮ

### Seznam symbolů

Značka	Jednotky	Název
$a_{max}$	[m/s <sup>2</sup> ]	maximální předpokládané zrychlení
$b$	[mm]	šířka zubů pastorku
$b_{max}$	[mm]	maximální šířka zubů pastorku
$C_{dyn}$	[N]	dynamická únosnost zvoleného vozíku
$d_a$	[mm]	průměr hlavové kružnice pastorku
$d_b$	[mm]	průměr základní kružnice pastorku
$d_f$	[mm]	průměr patní kružnice pastorku
$d_p$	[mm]	průměr roztečné kružnice pastorku
$E$	[GPa]	Youngův modul pružnosti
$F_G$	[N]	tíhová (gravitační) síla zatěžující nosník
$f_v$	[-]	třecí součinitel ve vedení
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	tíhové (gravitační) zrychlení
$h_{a0}$	[-]	součinitel výšky hlavy zubu
$inv\alpha$	[-]	involuta úhlu alfa
$inv\alpha_a$	[-]	involuta úhlu $\alpha_a$
$i_p$	[-]	převodový poměr vložené převodovky
$i_v$	[-]	počet lineárních kuličkových vozíků pro osu X
$i_x$	[-]	počet pohybových jednotek osy x
$I_{zz}$	[cm <sup>4</sup> ]	kvadratický moment průřezu
$J_1$	[kg·cm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti pastorku
$J_{br}$	[kg·cm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti brzdy
$J_{mot}$	[kg·cm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnost motoru
$J_p$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti vložené převodovky
$J_{rhm}$	[kg·cm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru
$L$	[km]	jmenovitá životnost zvolených vozíků v kilometrech
$L_h$	[hod]	životnost zvolených vozíků v hodinách
$L_{nosn}$	[mm]	délka nosníku mezi středy sloupů
$m_{1v}$	[kg]	hmotnost působící na jeden lineární kuličkový vozík
$M_{dyn}$	[N·m]	skutečný požadovaný krouticí moment na jeden motor
$M_{max}$	[N·m]	maximální krouticí moment zvoleného servomotoru
$M_{md}$	[N·m]	dynamický moment motoru
$M_{nom}$	[N·m]	nominální krouticí moment zvoleného servomotoru
$m_p$	[mm]	modul ozubení pastorku

$m_{\text{pastorek}}$	[kg]	hmotnost pastorku
$m_{\text{pn}}$	[kg]	hmotnost součástí zatěžující nosník portálu
$m_{\text{portál}}$	[kg]	předpokládaná celková hmotnost portálu
$m_z$	[kg]	předpokládaná hmotnost působící na 1 pár motorů
$n_{\text{max}}$	[min <sup>-1</sup> ]	maximální otáčky zvoleného servomotoru
$n_{\text{nom}}$	[min <sup>-1</sup> ]	nominální otáčky zvoleného servomotoru
$n_{\text{rp}}$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru při rychloposuvu
$o_p$	[mm]	obvod roztečné kružnice pastorku
$P$	[N]	ekvivalentní dynamické zatížení
$P_1$	[W]	minimální požadovaný výkon pro jeden pár servomotorů
$P_{\text{motoru}}$	[W]	výkon zvoleného servomotoru
$p_n$	[mm]	normální rozteč
$p_t$	[mm]	čelní rozteč
$P_{\text{teor}}$	[W]	teoretický požadovaný výkon pro jeden servomotor
$r_a$	[mm]	poloměr roztečné kružnice pastorku
$r_{\text{hřidel}}$	[mm]	poloměr výstupní hřídele zvoleného servomotoru
$s$	[mm]	tloušťka zubu
$s_{a\_min}$	[mm]	minimální tloušťka zubu na hlavové kružnici pastorku
$S_c$	[mm]	dráha rozběhu na maximální rychlost (rychloposuv)
$s_{na}$	[mm]	tloušťka zubu na hlavové kružnici
$t_{\text{rp}}$	[s]	čas rozběhu na maximální rychlost (rychloposuv)
$v_{\text{max}}$	[m/s]	rychlost při maximálních otáčkách zvoleného servomotoru
$v_{\text{nom}}$	[m/s]	rychlost při nominálních otáčkách zvoleného servomotoru
$v_{\text{rp}}$	[m/s]	maximální rychlost (rychloposuv)
$W_{\text{max}}$	[mm]	maximální průhyb nosníku
$x$	[mm]	jednotkové posunutí
$z$	[-]	počet zubů pastorku
$z_{\text{min}}$	[-]	minimální počet zubů, bez vzniku podřezání
$\alpha$	[°]	záběrový úhel
$\alpha_a$	[rad]	úhel profilu evolventy na hlavové kružnici pastorku
$\alpha_t$	[rad]	čelní úhel záběru
$\beta$	[°]	úhel šikmosti zubů
$\epsilon_m$	[rad/s <sup>2</sup> ]	úhlové zrychlené motoru
$\epsilon_p$	[rad/s <sup>2</sup> ]	úhlové zrychlené pastorku
$\eta_o$	[-]	účinnost vloženého převodu
$\eta_p$	[-]	účinnost vložené převodovky

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Teploty oblouku [4] .....	17
Tabulka 2 Doporučené parametry pro plazmové řezání [5] .....	18
Tabulka 3 Porovnání metod řezání plechu [6] [10] .....	23
Tabulka 4 Vyhodnocení volby nosné konstrukce .....	29
Tabulka 5 Vyhodnocení volby náhonu .....	32
Tabulka 6 Cenový odhad navrženého stroje .....	45

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Plazma ve formě blesku [28] .....	16
Obrázek 2 Řezání plazmou [3] .....	17
Obrázek 3 Svařování plazmou [7] .....	20
Obrázek 4 Obrábění s předehřevem materiálu [8] .....	21
Obrázek 5 Řezání vodním paprskem [29] .....	22
Obrázek 6 Stroj Vanad KOMPAKT [11] .....	25
Obrázek 7 CNC plazma Raptor 3015 [12] .....	25
Obrázek 8 Lincoln Electric - Torchmate X [13] .....	26
Obrázek 9 Hutní polotovary [15] .....	29
Obrázek 10 Hliníkový stavebnicový systém MB [14] .....	29
Obrázek 11 Spodní gántry .....	30
Obrázek 12 Horní gántry .....	30
Obrázek 13 Letmo uložené rameno [30] .....	30
Obrázek 14 Náhon maticí a kuličkovým šroubem [1] .....	31
Obrázek 15 Náhon Pastorkem a hřebenem [1] .....	31
Obrázek 16 Použitý systém Master – Slave [1] .....	32
Obrázek 17 Pohon SMC LEFS [17] .....	33
Obrázek 18 Servomotor Kollmorgen AKM22C [20] .....	39
Obrázek 19 Výkonnostní graf s vyznačením oblastí normálního běhu a přetížení [20] .....	39
Obrázek 20 Zvolený lineární kuličkový vozík a kolejnice [22] .....	40
Obrázek 21 Řezací hlava STAHLWERK P80 CNC [23] .....	41
Obrázek 22 Hyperherm Powermax105 SYNC [24] .....	42
Obrázek 23 Energetický řetěz [25] .....	43
Obrázek 24 Intuktivní senzor IFS257 [26] .....	44
Obrázek 25 Navržený plazmový řezací stroj .....	46

## SEZNAM PŘÍLOH

3D model sestavy [.step]

PLAZMOVÝ ŘEZACÍ STROJ

Výkresy

PLAZMOVÝ ŘEZACÍ STROJ

229222-01-00

SESTAVA PORTÁLU

229222-02-00

PORTÁLOVÁ KONSTRUKCE

229222-02-01

SPOJOVACÍ PLECH MOTORU

229222-01-04

PASTOREK

229222-01-05