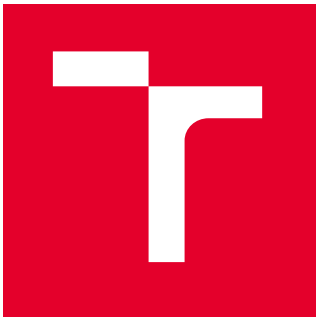


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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 KONSTRUKCE MANIPULÁTORU TYPU H-BOT

DESIGN OF THE H-BOT TYPE MANIPULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Jan Peřina**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Mikuláš Szabari, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2026

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	**Jan Peřina**
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Mikuláš Szabari, Ph.D.**
Akademický rok:	2025/26

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 konstrukce manipulátoru typu H–bot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student navrhne vysokorychlostní manipulátor typu H–bot. Manipulátor dosáhne rychlosti 5 m/s a jeho nosnost bude 0,5 kg. Pracovní prostor je vymezen kvádrem o rozměrech 1000x500x200 mm.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v dané oblasti.
Rozbor řešené problematiky.
Vytvoření nejméně dvou návrhových variant, jejich hodnocení a výběr vhodné varianty na základě multikriteriální analýzy.
Konstrukční návrh vybrané varianty.
Návrhové výpočty.
Výkresová dokumentace vybraných dílů a výkres sestavy.
Ekonomické zhodnocení.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

KOLÍBAL, Zdeněk a Zdeněk KADLEC. Průmyslové roboty II. Konstrukce výstupních hlavic a periferií. Brno: PC DIR, 1993, 165 s. ISBN 80-214-0533-3.

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Mikuláši Szabarimu, Ph.D za odborné vedení této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

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

V Brně dne 22.5.2026 ……

Peřina Jan

OBSAH

2.1 Manipulátory 11
2.1.1 Manuální manipulátory 11
2.1.2 Automatizované manipulátory 13
2.2 Řemenové převody 17
2.2.1 Převody s plochými řemeny 18
2.2.2 Převody s klínovými řemeny 18
2.2.3 Synchronní řemenové převody 19
2.3 Manipulátory typu H-bot 20
2.3.1 H-bot 20
2.3.2 CoreXY 21
2.3.3 CoreH-bot 22
2.4 Pohony 23
2.5 Koncové efektory 23
3.1 Zadané parametry 23
3.2 Multikriteriální analýza mechanismu 23
3.3 Výběr pohonu 24
3.4 Výběr řemenu 24
3.5 Výběr koncového efektoru 24
4.1 Konstrukce rámu manipulátoru 25
4.2 Konstrukce vedení osy X a Y 27
4.3 Konstrukce vedení osy Z 28
4.4 Konstrukce H-bot mechanismu 31
4.5 Řešení předpětí řemenu 32
5.1 Výpočet velikostí řemenic 33
5.2 Výpočet sil ve větvích řemene a předpětí 33
5.3 Statické výpočty 34
5.3.1 Nosnost vedení v ose Y 34
5.3.2 Nosnost vedení osy X 37
9.1 Seznam tabulek 49
9.2 Seznam obrázků 50
9.3 Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin 51

1 ÚVOD

Manipulátory jsou zařízení, které usnadňují lidskou práci při přesunu polotovarů, nebo výrobků. Tyto zařízení se používají v mnoha průmyslových odvětví, jako například v automobilovém, nebo farmaceutickém průmyslu.

Na začátku této práce se budeme zabývat rozdělením typů těchto zařízení, rozdělením řemenových převodů a jejich charakteristikou, rozdělením druhů konstrukcí H-botu, ze kterých následně vybereme pomocí multikriteriální analýzy ideální variantu pro naši konstrukci.

Následně zkonstruujeme vlastní námi vybranou variantu a provedeme potřebné návrhové a kontrolní výpočty. Motivací pro zpracování tohoto tématu je především zájem autora o automatizační a aditivní technologie.

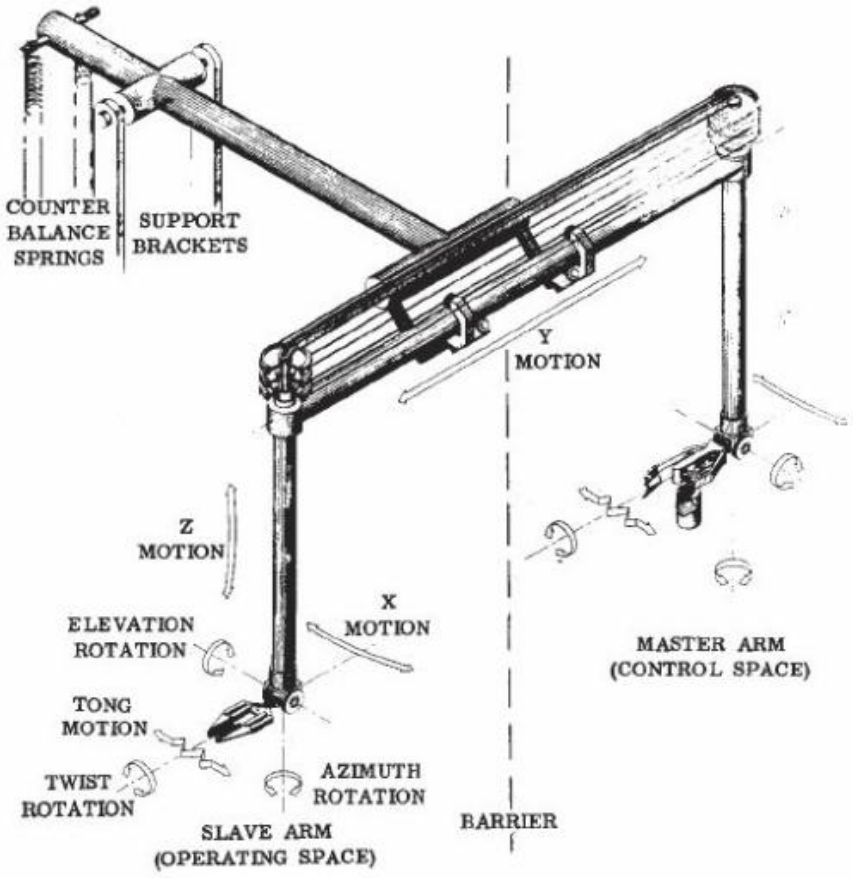
2 REŠERŠNÍ ČÁST

2.1 Manipulátory

Manipulátory jsou zařízení, která usnadňují lidskou práci, nebo ji umožňují v nebezpečném prostředí (např. práce ve vakuu, vysoce radioaktivním prostředí, nebo v extrémních teplotách.). Tato zařízení mají většinou několik stupňů volnosti a bývají z pravidla poháněny ručně, nebo počítačovým zařízením. Nejčastěji jsou využívány ve strojírenském, farmaceutickém průmyslu, nebo také ve velkých skladech pro manipulaci s paletami. Manipulátory by se dali rozdělit do pěti typů: manuální, sférický, cylindrický, kartézský a kombinovaný. [1]

2.1.1 Manuální manipulátory

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší typ manipulátoru. Toto zařízení bylo vyvinuto primárně kvůli odvětví jaderných věd. Jeden z prvních takových manipulátorů vynalezl vědec Raymond Goertz v roce 1948 v Argonne National Laboratory v U.S.A.. [1]



Obr. 1 Schéma teleoperátoru [2]

Toto zařízení se skládá ze dvou hlavních částí: Ovládací rameno „Master“ a ovládané rameno „Slave“. Hlavní myšlenka tohoto zařízení byla taková, že operátor mohl vykonávat technologické operace v nebezpečném prostředí bez jakéhokoliv rizika úrazu. Tento Manipulátor byl schopen se pohybovat se sedmi stupni volnosti, jak je zobrazeno na obr. 1.

Tato konstrukce se ovšem potýkala i s mnoha limitacemi, jako je například nosnost zařízení, či velikost pracovního prostoru, jelikož kdybychom chtěli přesunout břemeno o hmotnosti například 10kg a chtěli ho přenést do vzdálenosti např. 2m, potýkali bychom se se značně větší deformací ramene, než například na vzdálenost 1m, tudíž bychom měli menší přesnost manipulace.

Dále si na konstrukci můžeme povšimnout protizávaží, které zajišťují udržení rovnováhy celého zařízení. Tím však vznikají setrvačné síly, které za provozu musí operátor vyrovnávat. Tím se značně zvyšuje námaha operátora při snaze dosáhnout požadované pracovní rychlosti. [1]

Mezi moderní teleoperátory se řadí například operační „robot“ DaVinci. Tento systém se skládá ze tří hlavních částí: Operační konzola, Přístrojová věž a Ovládací konzola. Operační konzola má čtyři ramena (tři ramena drží operační nástroje, jedno rameno drží kameru), jež mají pohyblivost téměř jako lidská ruka, což umožňuje vykonávat výkony ve špatně přístupných oblastech s velmi vysokou přesností. Ovládací konzola je místo, od kterého lékař řídí celou operaci pomocí joysticků. Hlavní výhodou tohoto teleoperátoru je ta, že dokáže eliminovat třes rukou chirurga, což snižuje operační rizika. [3]

Obr. 2 Operační robot DaVinci [4]

Vývoj operačních robotů stále postupuje. Jeden z nově vyvíjených robotů pro chirurgické zákroky je robot Sofie. Tento robot je, při porovnání s robotem DaVinci, kompaktnější a zároveň umožňuje chirurgovi cítit přímý odpor od nástroje, čímž může kontrolovat sílu ramena robotu. [3]

Obr. 3 Operační robot Sofie [5]

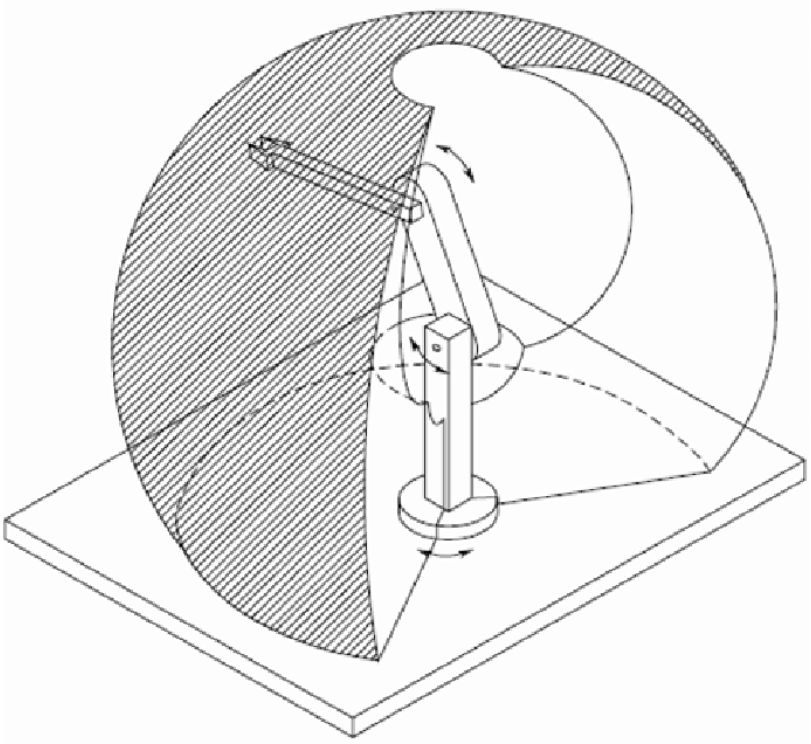
2.1.2 Automatizované manipulátory

Automatizované manipulátory již nepotřebují přímé ovládání člověkem. Pohyb jednotlivých členů konstrukčních uzlů je dosaženo pomocí různých pohonů, zejména elektromotorů. Dále by se dali rozdělit dle pracovního prostoru a to na: Sférické, Cylindrické, Kartézské a kombinované manipulátory

Sférické manipulátory

Sférické manipulátory mají pracovní prostor, jak už název napovídá, ve tvaru koule o maximálních poloměrech r_1+r_2. Koncový efektor by měl ideálně být schopný se dostat do jakéhokoliv bodu v tomto prostoru, ve skutečnosti však tomu není úplně pravdou a jsou zde body, do kterých se bohužel koncový efektor nedostane, jelikož by se mohlo například stát, že při specifické rotaci φ, by mohlo dojít k překřížení kabelů, jež napájejí celé zařízení. Těmto bodům říkáme mrtvé body. [1]

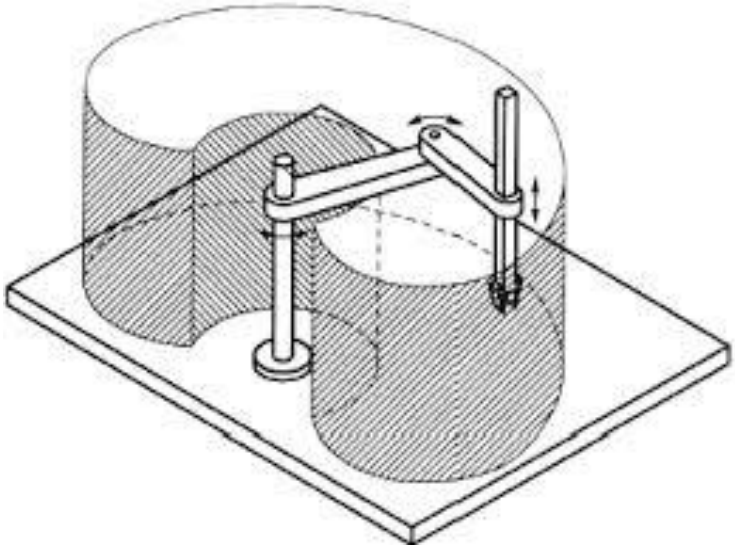
Sférického pracovního prostoru můžeme dosáhnout pomocí třech rotačních pohybů (viz. Obr. 4) a celý systém pracuje na bázi sférického souřadného systému.



Obr. 4 Pracovní prostor sférického manipulátoru [6]

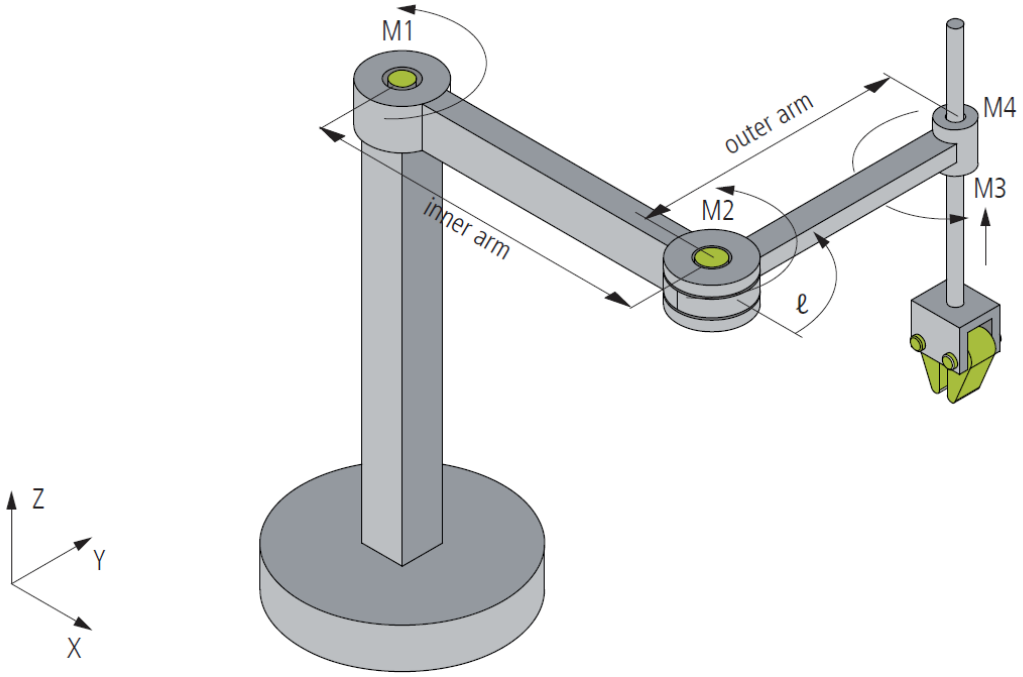
Cylindrické manipulátory

Pracovní prostor cylindrických, neboli válcových, manipulátorů zastává tvaru válce, který má při plném natažení ramenou rozměry r_1+r_2. Dominantním pohybem je zde pohyb rotační a pohyb v ose Z vykonává koncový efektor pomocí translačního pohybu.



Obr. 5 Cylindrický manipulátor a jeho pracovní prostor [7]

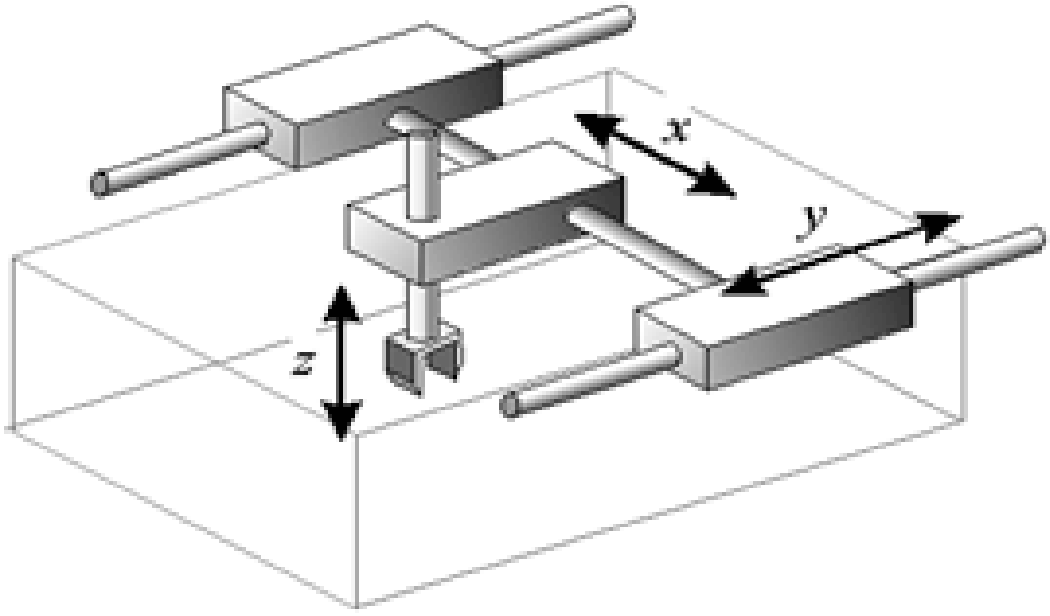
Stejně jako u sférického manipulátoru není pracovní prostor perfektní, i zde se nachází takzvané mrtvé body, zejména poblíž základny a některá natočení nejsou možná z důvodů vedení kabelů. Typický cylindrický manipulátor je např. robot SCARA. [1]



Obr. 6 Schéma robotu SCARA [8]

Kartézské manipulátory

U kartézských manipulátorů nedochází k rotačnímu pohybu a veškeré posuny v osách X, Y a Z jsou prováděny pomocí pohybů translačních, pomocí kterých se koncový efektor je schopen dostat, díky příslušným kombinacím, do jakéhokoliv bodu pracovního prostoru [1]. Příkladem kartézského manipulátoru by mohl být například H-bot.

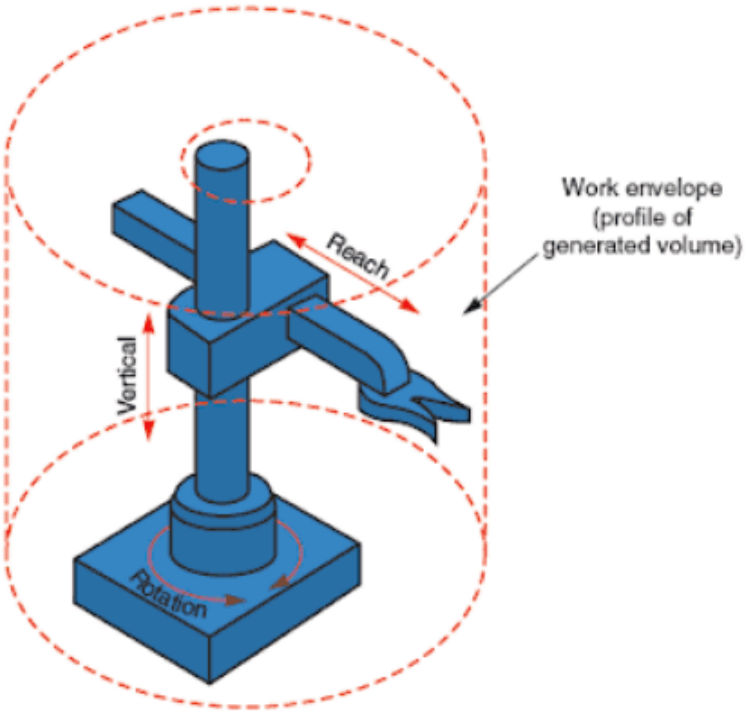


Obr. 7 Kartézský manipulátor a jeho pracovní prostor [9]

Kombinované manipulátory

Kombinované manipulátory využívají kombinaci pohybů z výše uvedených typů manipulátorů. Na obr. 8 můžeme vidět příklad takového manipulátoru, kde pracovní prostor tohoto

manipulátoru je shodný s cylindrickým, avšak tohoto prostoru je dosaženo jinou kombinací pohybů. Pohyb v ose Z je dosažen stejně, tedy translačním pohybem, ale pohyb v ose R, respektive poloměru pracovního prostoru, již není jak u cylindrického manipulátoru dosažen příslušnou kombinací rotací, ale translačním pohybem jak v ose Z. Úhel otočení φ je opět dosažen rotačním pohybem.



Obr. 8 Schéma kombinovaného cylindrického manipulátoru s lineárně koordinovaným manipulátorem [10]

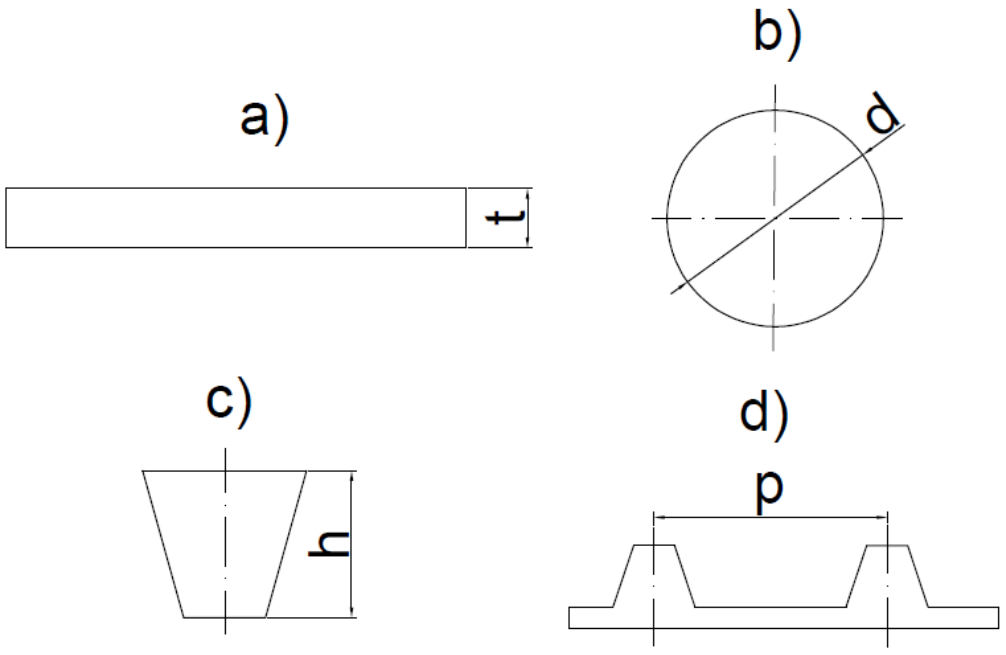
2.2 Řemenové převody

Řemenové převody jsou převody, jež využívají pro přenos výkonu pružné převodové členy. Tento druh mechanismů se využívá nejčastěji u dopravních zařízení, avšak mají mnoha dalších využití. [11]

Pro realizaci těchto převodů se používají čtyři základní druhy řemenů, které jsou shrnuty v tab. 1.

Tabulka 1 Vybrané technické údaje běžně užívaných druhů řemenů [11]

Druh řemenu	Průřez řemenu	Spojení konců při montáži	Charakteristický rozměr	Osová vzdálenost
Plochý	Viz. Obr. 9	Ano	t = 0.75 – 6.8 mm	Bez omezení
Kruhový	Viz. Obr. 9	Ano	d = 3 – 20 mm	Bez omezení
Klínový	Viz. Obr. 9	Ne	h = 4 – 25 mm	Omezená
Ozubený	Viz. Obr. 9	Ne	p = 2.032 mm a více	Omezená



Obr. 9 Průřezy řemenů. a) Plochý řemen; b) Kruhový řemen; c) Klínový řemen; d) Ozubený řemen

Pro každý typ řemenu musí být přizpůsobena konstrukce funkčních ploch řemenic:

Tabulka 2 Funkční plochy řemenic pro dané typy řemenů [11]

Druh řemenu	Funkční plocha řemenice
Plochý	Klenutá
Kruhový	Půlkruhová nebo klínová drážka
Klínový	Rovnoramenný lichoběžník
Ozubený	Ozubení

Mezi přední vlastnosti řemenových převodů patří:

- Možnost přenosu výkonu na větší vzdálenosti
- Pružnost převodu (tlumení kmitání, zachycování rázových zatížení)
- Jednodušší konstrukce
- Nižší cena (v porovnání s např. ozubenými převody)

2.2.1 Převody s plochými řemeny

Hlavními výhodami těchto řemenů je vysoká účinnost, tichý chod a schopnost lépe tlumit torzní kmitání v řemenu. Dosahuje účinnosti okolo 98%, což je účinnost, které dosahují ozubené převody. Tato účinnost je výrazně vyšší než u převodu klínovými řemeny, které dosahují účinnosti v rozmezí od 70 do 96%. Ploché řemeny se skládají ze dvou hlavních vrstev.

Styková vrstva, jež slouží k přenosu třecích sil mezi funkční plochou řemenice a samotným řemenem a bývá vyráběna z pryže, polyamidu, nebo z urethanu. Tato vrstva pokrývá vnější část řemenu, může být buď pouze z jedné strany, nebo z obou stran. Pokud je styková vrstva pouze na jedné straně řemenu, tak musí být druhá strana pokryta ochrannou vrstvou. Ta bývá zpravidla vyrobena z textilních materiálů.

Tažná vrstva slouží k přenosu obvodové síly. Ta může být vyrobena z polyesterové, aramidové či nylonové tkaniny, nebo z ocelového drátu. [11]

2.2.2 Převody s klínovými řemeny

Klínové řemeny se dají rozdělit na několik typů. Řemeny jednoduché (klasického průřezu a úzké), násobné, šestihranné, variátorové, žebrové, zemědělské a automobilové.

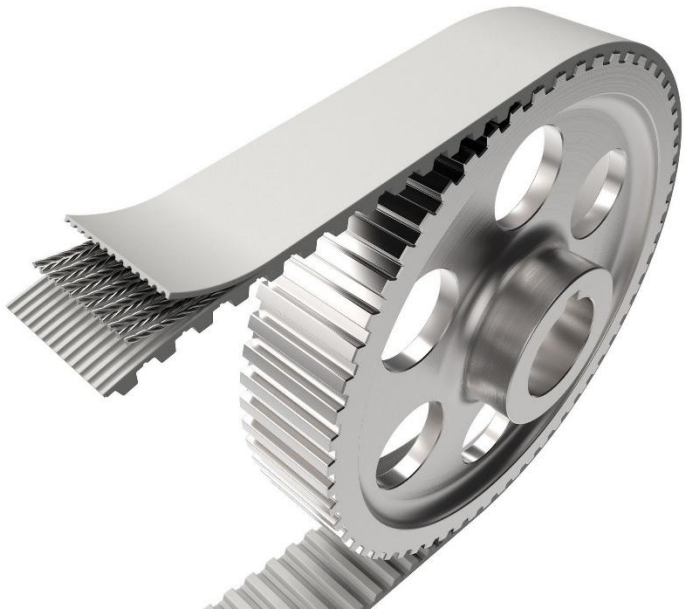
Obr. 10 Druhy klínových řemenů dle užití a tvaru [12]

Dále se dají rozdělit dle způsobu úpravy povrchu řemene a to na obalované, řezané a speciální. Hlavním rozdílem mezi obalovanými a řezanými řemeny je ten, že obalované řemeny jsou po celém povrchu chráněny pryžovým textilním obalem, zatímco řezané mají nekryté broušené boky s viditelnou tažnou vrstvou. Výhody řezaných řemenů oproti obalovaným jsou: delší životnost, vyšší obvodová rychlost, zvýšený přenos výkonu a lepší teplotní odolnost. [11] [12]

Obr. 11 Druhy klínových řemenů dle provedení a technologie výroby [12]

2.2.3 Synchronní řemenové převody

Velikou výhodou synchronních řemenových převodů je ta, že nedochází ke skluzu, toho je dosaženo pomocí typu přenášení výkonu. Na rozdíl od výše zmíněných typů řemenových převodů nedochází k přenosu výkonu třením, ale tvarovým stykem. Díky tomu se hnací i hnaná řemenice otáčí stejnou obvodovou rychlostí, chod je tichý a plynulý. Tento typ převodu, společně s plochými řemeny, dosahuje velmi vysoké účinnosti a to od 97 do 99%. Díky své schopnosti pracovat bez prokluzu jsme schopni zajistit přesné časování všech řemenic, což je veliká výhoda pro konstrukci manipulátorů, jež jsou poháněny těmito převody. Zároveň dokáží pracovat s menším předpětím, díky čemuž dochází k menšímu zatěžování ložisek a hřídelí. [11] [13]



Obr. 12 Záběr ozubeného řemenu [14]

Ozubené řemeny se skládají, jak lze vidět na obr. 10, z několika vrstev. Ozubení, jež zajišťuje tvarový styk, je pokryto stykovou vrstvou, tažná vrstva, jež stejně jako u ostatních řemenů zajišťuje přenos obvodové síly a ochranná vrstva chránící řemen před mechanickým a chemickým opotřebením. Dále se ozubené řemeny dají dělit dle materiálu ze kterého je vyroben a to na neoprenové a polyuretanové.

Polyuretanové řemeny se vyznačují svojí vysokou odolností vůči stárnutí a chemickému opotřebení. Této odolnosti je dosaženo pomocí tažné vrstvy, která je vyrobena z ocelových šroubovitě vinutých drátů. Vyznačují se světlou barvou a jsou primárně využívány jako hnací nebo transportní řemeny. Neoprenové řemeny mají tažnou vrstvu tvořenou ze šroubovitě vinutých skelných vláken, jsou samomazné díky své stykové vrstvě, která je vyráběna z grafitem impregnované tkaniny. Neoprenové řemeny můžeme rozpoznat od polyuretanových díky jeho černé barvě. Dále se dají tyto řemeny ještě dělit dle druhu profilu zubu a to na řemeny s lichoběžníkovým, parabolickým, nebo speciálním tvarem zubu. Nejčastěji se využívají ozubené řemeny neoprenové s lichoběžníkovým tvarem zubu. Ty se dále dělí na šest typů dle normy ISO 5296-1:1989: MXL, XL, L, H, XH a XXH. Nejčastěji využívané polyuretanové řemeny jsou řemeny s normalizovaným lichoběžníkovým tvarem zubu dle normy ISO 17396:2017 a DIN 7721-1, 2. Ty se dělí na čtyři základní profily T2,5, T5, T10 a T20 a tři vylepšené AT5, AT10 a AT20. Řemeny s parabolickým profilem zubu jsou normalizovány dle normy ISO 13050:2014. [11]

Tabulka 3 Vybrané technické údaje neoprenových ozubených řemenů s lichoběžníkovým tvarem zubů [11]

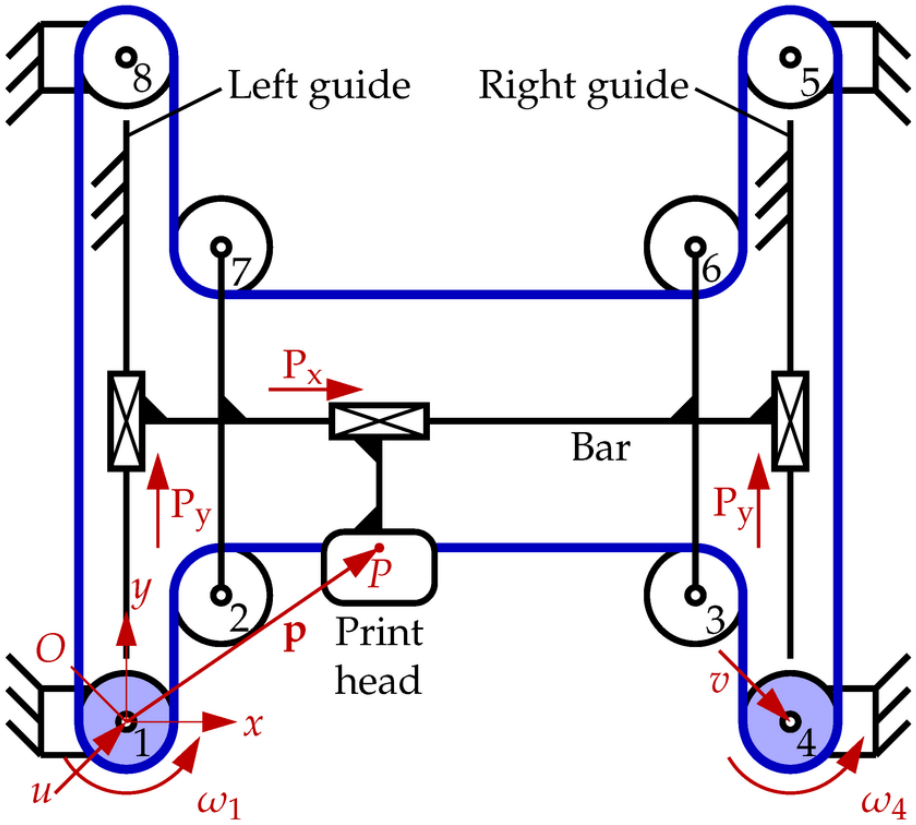
Typ řemenu	Rozteč zubů	Výška řemenu	Šířka řemenu	Minimální počet zubů řemenice	Jmenovitý výkon přenášený řemenem o šířce 25.4 mm
	p [mm; in]	h_s [mm]	b [mm]	z_{min} [-]	P_R [W]
MXL	2.032; 0.080	1.14	3.18 - 6.35	10 - 14	1 - 231
XL	5.080; 0.200	2.30	6.35 - 25.4	10 - 14	15 - 3498
L	0.525; 0.375	3.60	12.7 - 76.2	12 - 20	0.05 - 4.72
H	12.700; 0.500	4.30	19.05 - 127.0	16 - 24	0.21 - 16.33
XH	22.225; 0.875	11.20	50.8 - 177.8	20 - 24	0.63 - 16.93

2.3 Manipulátory typu H-bot

Kartézské manipulátory mohou být poháněny několika způsoby, jedním z nich je například „H-bot“ mechanismus. Tento název nese z důvodu vzhledu mechanismu, kde vedení řemenů připomíná písmeno „H“. S tímto mechanismem se můžeme nejčastěji setkat u 3D tiskáren. H-bot se dále dá rozdělit na 3 typy. H-bot, CoreXY a CoreH-bot. [15]

2.3.1 H-bot

Jedná se o konstrukčně nejjednodušší typ H-bot manipulátoru. H-bot mechanismus se skládá z osmi řemenic, čtyři pevně uchycené k rámu a čtyři ,,volné'', jež jsou upevněné na pohyblivé příčce, která se pohybuje podél osy y. Celý mechanismus je poháněn jednostranně ozubeným řemenem s otevřenými konci. Ozubená část řemene je vedená směrem dovnitř smyčky, tudíž ozubené řemenice jsou pouze pevně uchycené řemenice, jelikož u volných řemenic se řemen dostává do kontaktu pouze hladkou vnější částí řemene. Při nasazování řemene se jeho otevřené konce přichytí ke konstrukci na které je připevněn koncový efektor viz. Obr. 13. [15]



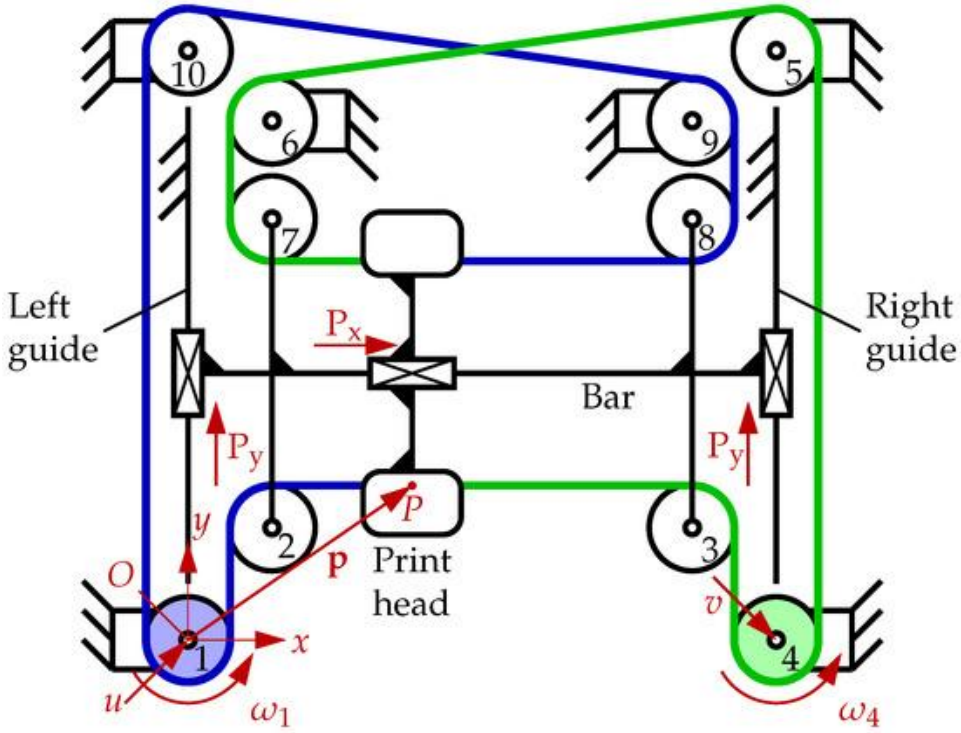
Obr. 13 Schéma vedení typuy H-bot [15]

Celý mechanismus je poháněn dvěma motory, jež jsou připevněny ke 2 pevným řemenicím. Kombinacemi rotačních pohybů ω_1 a ω_4 poháněných řemenic se dokáže koncový efektor dostat do jakéhokoliv bodu pracovního prostoru. Tento mechanismus se v dnešní době používá primárně k pohonu 3D tiskáren, avšak tento mechanismus se používal už dříve, například pro pozicování rentgenových zařízení, laserových řezaček, apod..

Jelikož je celý mechanismus poháněný jedním dlouhým řemenem, tak není mechanismus tolik tuhý a dochází k vibracím. [15]

2.3.2 CoreXY

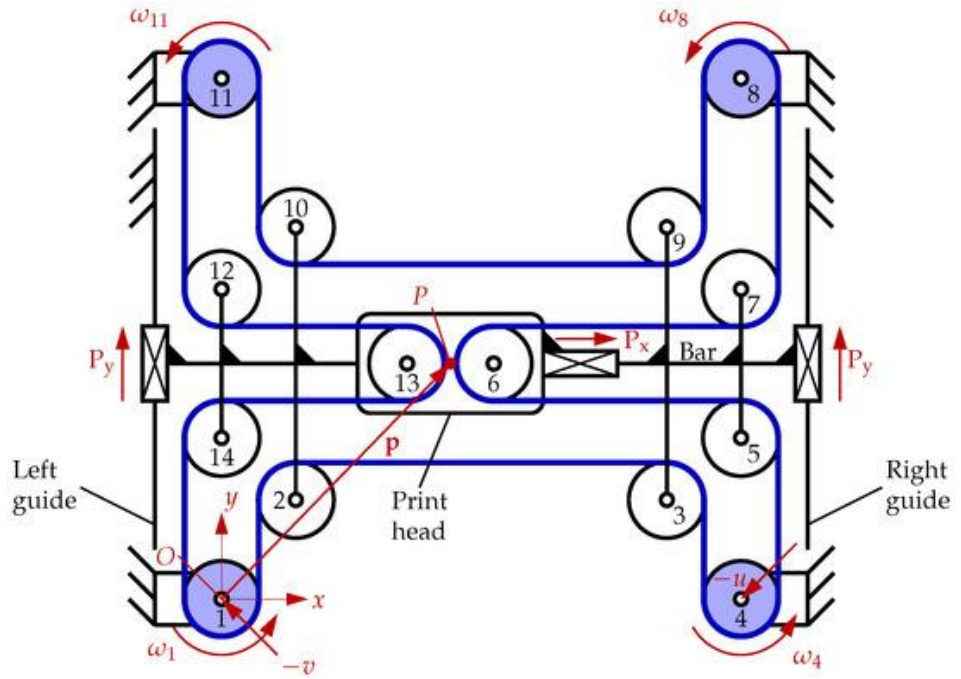
CoreXY mechanismus je poháněn pomocí dvou synchronních (ozubených) řemenů s volnými konci, jež jsou oba připevněny svými volnými konci ke konstrukci koncového efektoru, viz. Obr. 14. Jelikož je tato konstrukce tvořena z dvou kratších řemenů, tak má celý mechanismus oproti H-botu větší tuhost a dochází k menším vibracím, díky tomu taktéž je schopen dosáhnout větších rychlostí, ale rozdíl není příliš veliký. Konstrukce je ale složitější, jelikož je zde potřeba více kladek a řemeny se kříží, tudíž je konstrukce prostorově větší. [15]



Obr. 14 Schéma vedení CoreXY [15]

2.3.3 CoreH-bot

CoreH-bot je další konstrukční variantou H-botu. Mezi hlavní rozdíly od H-botu či CoreXY, jak si lze na Obr.15 povšimnout, je počet pohonů a též to, že se již nejedná o otevřené řemenové smyčky. Touto uzavřenou smyčkou je dosaženo větší přesnosti, tuhosti a menších vibrací. Primární nevýhodou však je ta, že je sestava nyní přeurčená, jelikož čtyři motory ovládají 2° volnosti. [15]



Obr. 15 Schéma vedení CoreH-bot [15]

2.4 Pohony

Pohony jsou stěžejní součástí automatizovaných manipulátorů. Pohyby jednotlivých prvků mohou být zajištěny pomocí několika variant pohonů. Mechanické, elektromagnetické, elektrické, hydraulické a pneumatické. [1] [3]

2.5 Koncové efektory

Koncové efektory slouží k samotné manipulaci výrobku. Může se jednat o mezioperační manipulace, vyjímání nebo vkládání výrobků do výrobních zařízení, technologické a kontrolní operace, nebo speciální práce. [3]

Z konstrukčního hlediska se koncové efektory PRaM (Průmyslových Robotů a Manipulátorů) dělí následovně [3]:

1. Technologické výstupní hlavice. To mohou být například efektory, které mohou dělat montážní práce, svařovací práce, provádět nátěry, lepení, atd..
2. Manipulační výstupní hlavice. Tyto hlavice slouží k manipulaci daných objektů. Tyto efektory se dají dále dělit na mechanické, magnetické nebo podtlakové. Další dělící kritérium je zda jsou pasivní, či aktivní.
3. Kombinované výstupní hlavice. Tyto efektory kombinují funkci manipulační a technologické hlavice.
4. Speciální výstupní hlavice.

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

V této části se zaměříme na analýzu zadání, multikriteriální analýzu vybraných konstrukcí a vybrání jednotlivých konstrukčních parametrů.

3.1 Zadané parametry

Navrhovaný manipulátor by měl splňovat následující parametry:

- Pracovní prostor: 1000x500x200 mm
- Dosahovaná rychlost: 5 m/s
- Nosnost manipulátoru: 0.5 kg

3.2 Multikriteriální analýza mechanismu

V této kapitole se zaměříme na výběr konceptu mechanismu. V následující tabulce jsou uvedena kritéria, jež jsou pro náš návrh stěžejní a přiřadíme jim body od 1 do 10, kde 10 značí to, že je tato varianta v tomto kritériu výhodná a 1 značí nejméně vhodnou konstrukci.

Tabulka 4 Hodnocení jednotlivých variant konstrukce mechanismu

Kritérium	**Varianta**		
	H-bot	CoreXY	CoreH-bot
Rychlost	7	8	10
Tuhost	7	8	10
Přesnost	7	8	10
Jednoduchost konstrukce	9	6	3
Náročnost montáže	10	6	3
Cena	8	5	3
Celkem	48	41	39

Po zvážení nejvíce, pro naší konstrukci, důležitých kritérií jsme došli k závěru, že pro naše řešení využijeme H-bot mechanismus.

3.3 Výběr pohonu

Pro pohon našeho manipulátoru jsme zvolili Servomotor SMARTSTEP2 200V Servo 3000 ot/min o výkon 200W [16]. Servomotor jsme zvolili nad krokovým z důvodu vysoké požadované rychlosti.

3.4 Výběr řemenu

Pro výběr řemenu využijeme tab.3. Jelikož už máme vybraný motor, který bude pohánět řemenice, tak můžeme pomocí výkonu motoru vybrat typ neoprenového řemenu s lichoběžníkovým tvarem zubu.

Přenášený výkon je 200W, což nám pasuje na 2 řemeny: XL a MXL. Z důvodu kompaktnosti (šířka řemene, tím pádem i řemenice), volím řemen MXL.

3.5 Výběr koncového efektoru

Vzhledem k nízké zadané nosnosti jsme zvolili aktivní podtlakový koncový efektor. Dle rozměrů jsme zvolili koncový efektor VPB-91-01-G1/4-F [17] s vakuovou přísavkou VVA-27-G1/4-T-A [18].

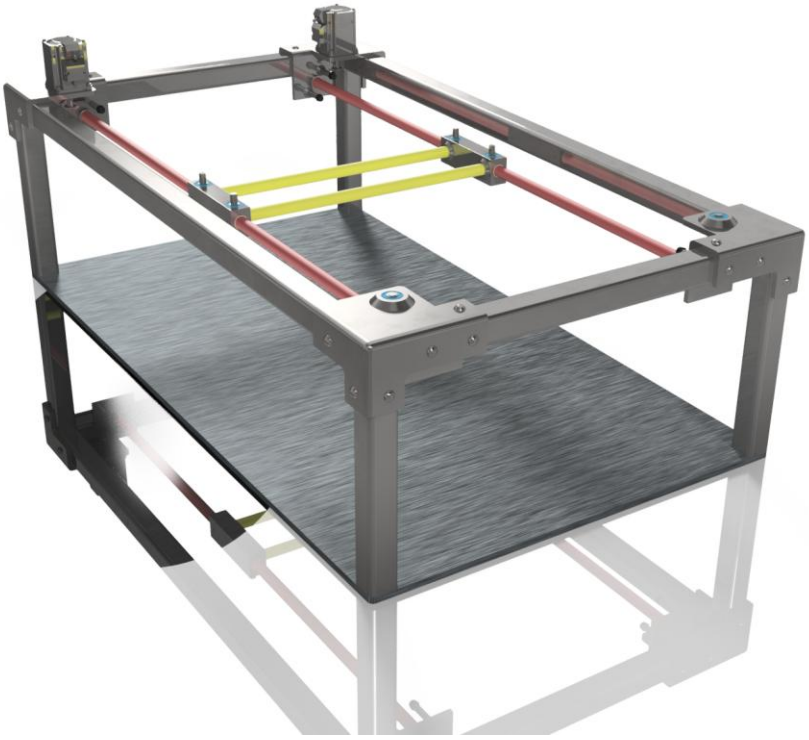
4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této části práce se budeme zabývat návrhem jednotlivých konstrukčních uzlů, tedy rámu, vedení osy X, vedení osy Y, vedení osy Z a mechanismu H-bot.

4.1 Konstrukce rámu manipulátoru

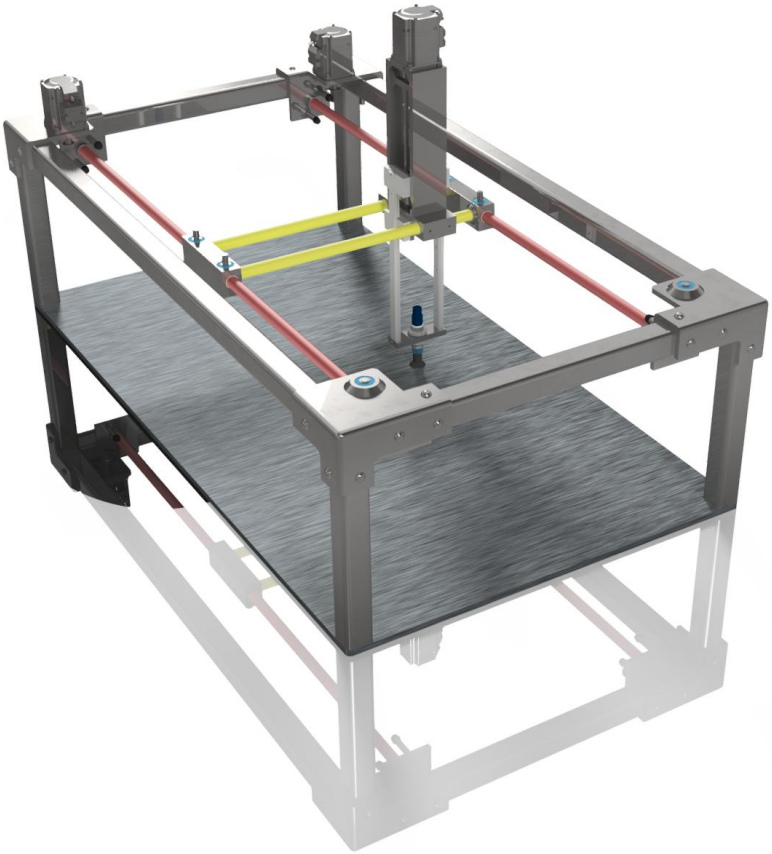
Obr. 16 Rám manipulátoru

Rám tohoto manipulátoru (obr. 16) je navržen tak, že s mírným offsetem obepíná pracovní prostor manipulátoru tak, aby pracovní prostor měl rozměry 1000x500x200 mm. Rám je tvořen z Jaklů 40x40x4 Na, z pohledu na obr. 16, zadních dvou rozích rámu jsou přinýtované obrobené díly, jež slouží k upnutí servomotorů, které pohání pohyb os X a Y, zatímco na rozích blíže k nám jsou ložiskové domky, ve kterých jsou uloženy hřídele pro hnané řemenice. V těchto domcích jsou nalisována valivá ložiska 6000-ZTN9/LT [19]. Vedle nich jsou, též pomocí nýtů, připevněny díly, které slouží k uchycení dorazů a vodících tyčí pro osu Y. Tyto vodící tyče jsou dále zajištěny pomocí šroubů DIN 7984 M5x12.



Obr. 17 Vedení osy X a Y namontované v rámu

Na obr. 17 jsou vyobrazeny namontované lineární vedení osy X a Y (Osa Y – červeně; Osa X – modře). Na vedení osy X se následně pohybuje konstrukční uzel, v němž je ukotven koncový efektor a umožňuje jeho pohyb po ose Z.



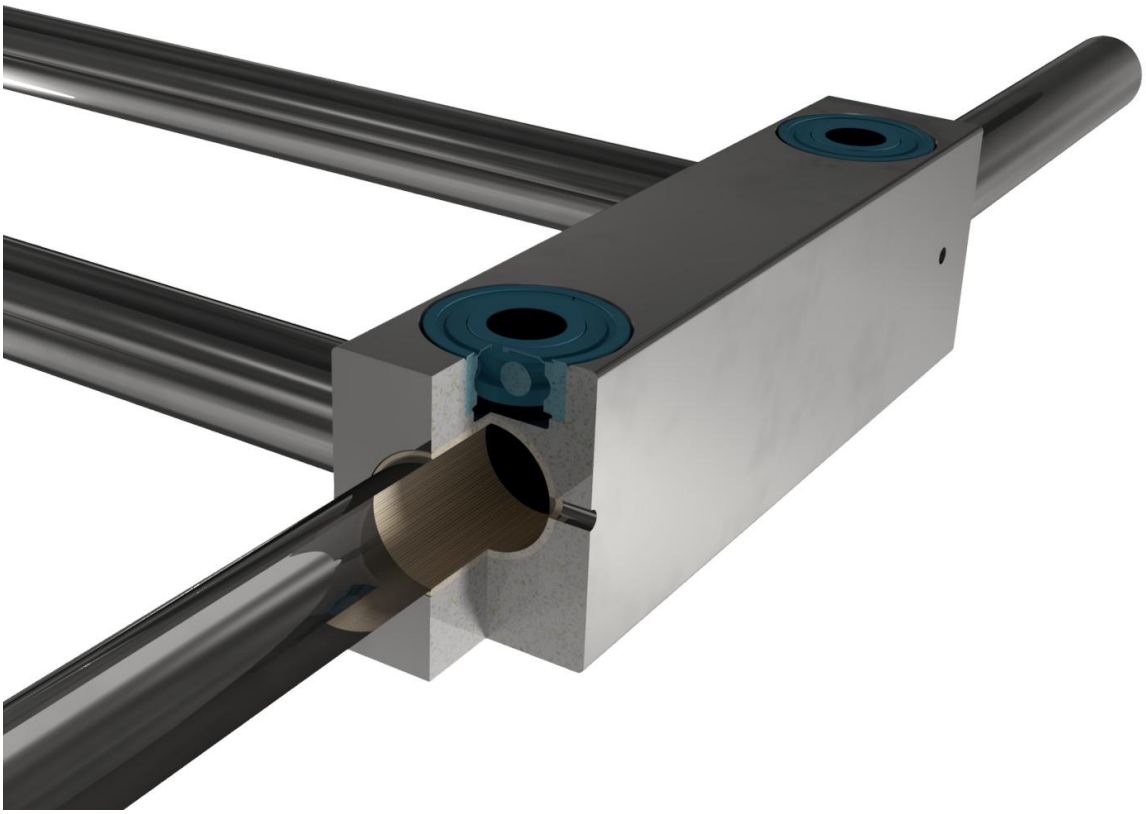
Obr. 18 Upevněný konstrukční uzel pro vedení v ose Z

S celým mechanismem pohybujeme pomocí tří servomotorů. Každý servomotor pohybuje s efektorem v jednom směru. Dva servomotory jsou napojeny na H-bot mechanismus (pohybují osami X a Y) a jeden samostatný motor je připojen na konstrukční uzel pro osu Z.

4.2 Konstrukce vedení osy X a Y

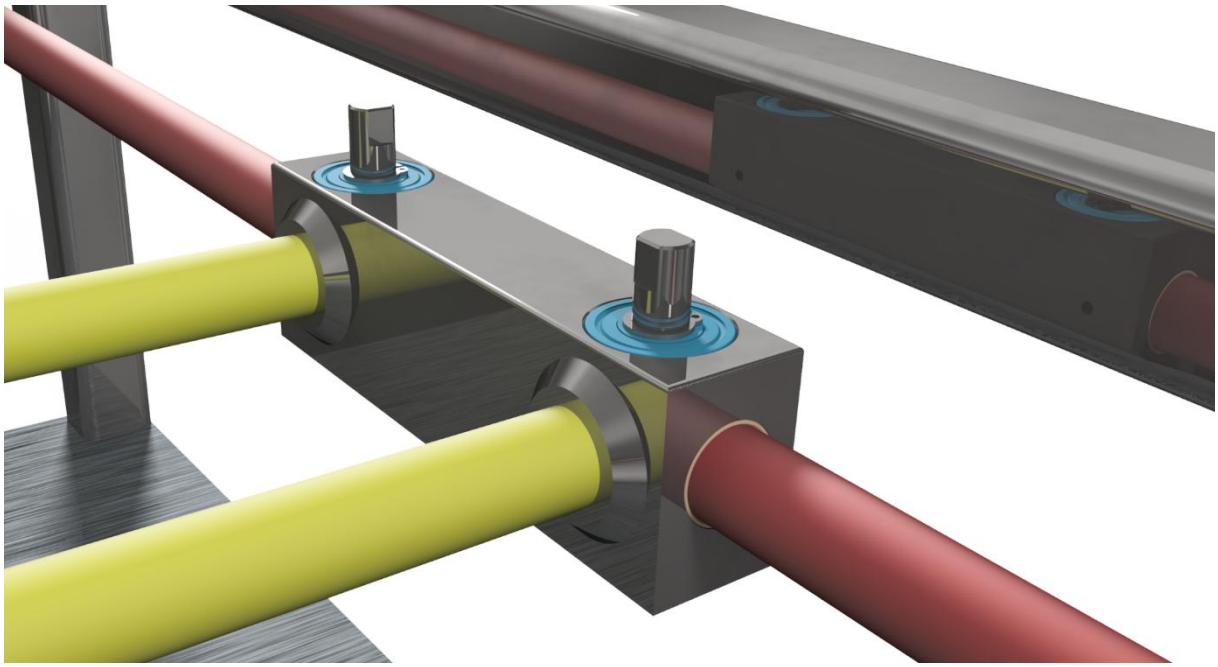
V této kapitole se detailně zaměříme na konstrukční řešení vedení osy X a Y.

Jako lineární vodící prvek jsme použili vodící tyč o průměru 18h6 z materiálu Cf53. [20] Po této tyči jezdí jezdec s kompozitními přímými pouzdry PCM 182025 M [21] (na obr. 19 béžově). Na horní části jezdce jsou nalisována opět valivá ložiska 6000-ZTN9/LT [19] (na obr. 19 modře). Do těch se následně uloží hřídele, které jsou napojeny na řemenice H-bot mechanismu.



Obr. 19 Jezdec osy Y

Tyto jezdce jsou na obou stranách mechanismu a jsou spojeny vodícími tyčemi, po kterých se následně pohybuje konstrukční uzel osy Z.



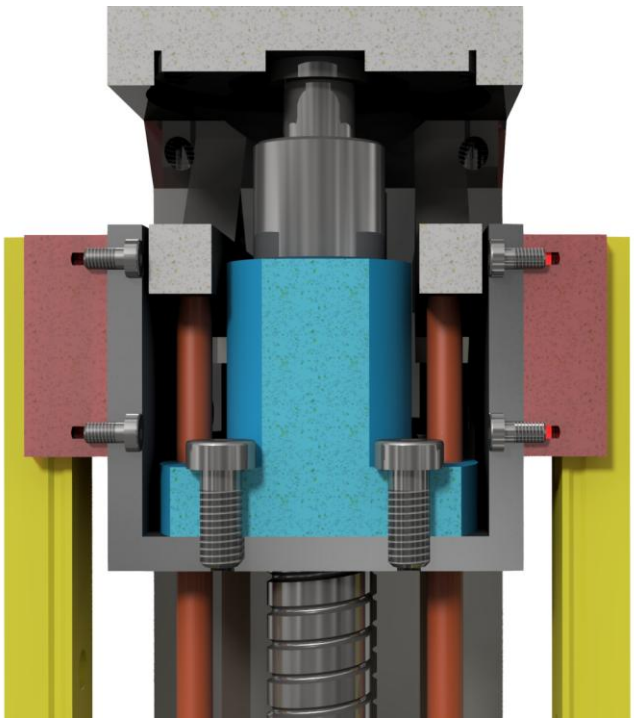
Obr. 20 Jezdec osy Y s hřídelemi

4.3 Konstrukce vedení osy Z

V této podkapitole si rozebereme vedení koncového efektoru v ose Z. Tato osa jako jediná není poháněna H-bot mechanismem. Místo toho jsme zde využili vodící lišty MGN12 [22] a kuličkový šroub s maticí 1605 [23].

Obr. 21 Vedení osy Z (zavřené)

Obr. 22 Vedení osy Z (otevřené)



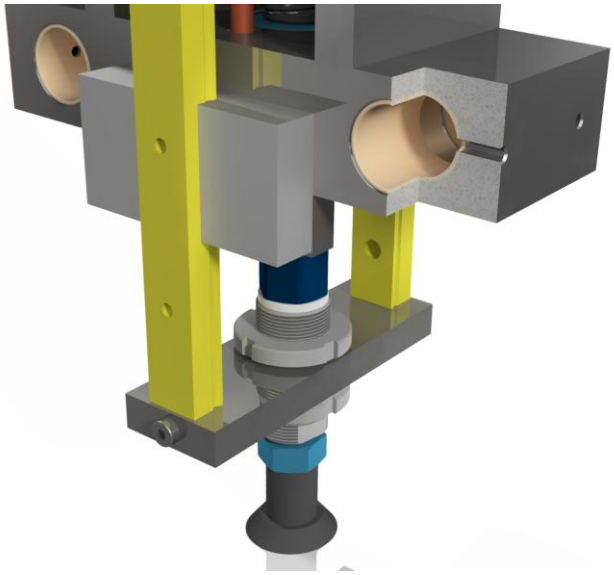
Obr. 23 Detail na mechanismus lineárního vedení osy Z

Když bychom si rozebrali tento konstrukční uzel postupně od horní části při zavřeném stavu (viz. Řez obr. 23). Na horní části uzlu je připojen servomotor, jež je napojený kuličkový šroub, který je ve spodní části uložen v ložisku 6000-ZTN9/LT [19]. Na tento šroub je našroubovaná kuličková matice (na obr. 23 modře) [23], ve které jsou zalisována kluzná ložiska SKF PCM 040510 E/VB055 [24], v níž jsou vedeny ve vodící tyče o průměru 4 mm (oranžově). Tato matice je zároveň přišroubována k plechu, který je přišroubován k jezdcům vodící lišty

MGN12 (červeně) [22]. Tyto jezdce jsou k liště připevněn na pevno. Při pohybu matice dolů se tedy posouvá celá lišta.

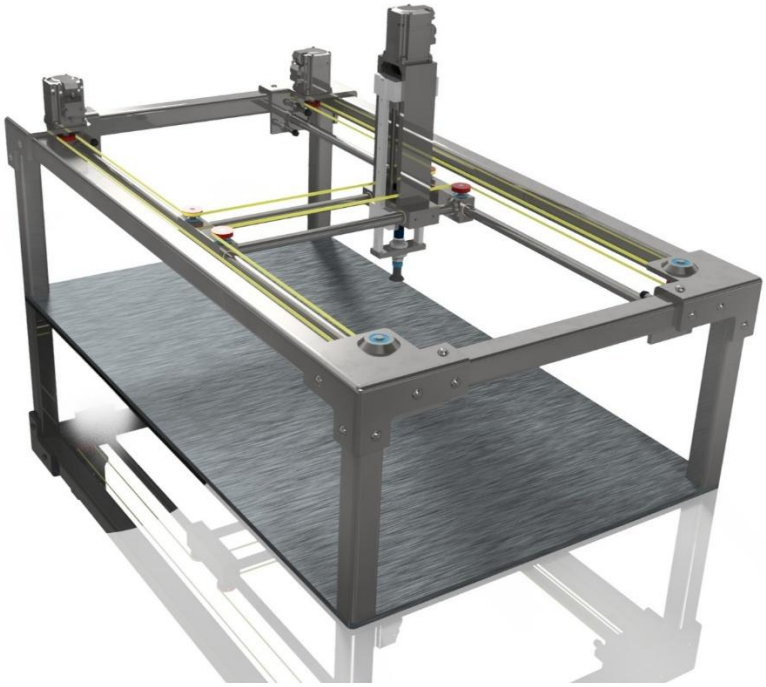
Obr. 24 Detail na vysunuté vedení osy Z

Jak lze vidět na obrázku 24, tak tímto posunutím lišty posouváme koncový efektor v ose Z. Po ose X se tento mechanismus pohybuje pomocí H-bot mechanismu. Celý tento uzel je nasazen na vodící tyče osy X a pohybují se obdobně jako jezdci po ose Y, tudíž pomocí kompozitních přímých pouzder PCM 182025 M [21] (na obr. 25 béžově).



Obr. 25 Detail na kompozitní přímá pouzdra PCM 182025 M

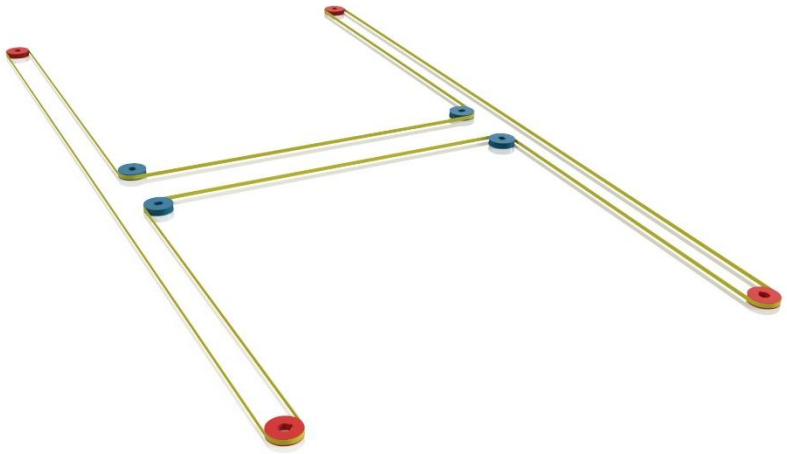
4.4 Konstrukce H-bot mechanismu



Obr. 26 Ukotvený H-bot mechanismus (vyznačeno žlutě/červeně)

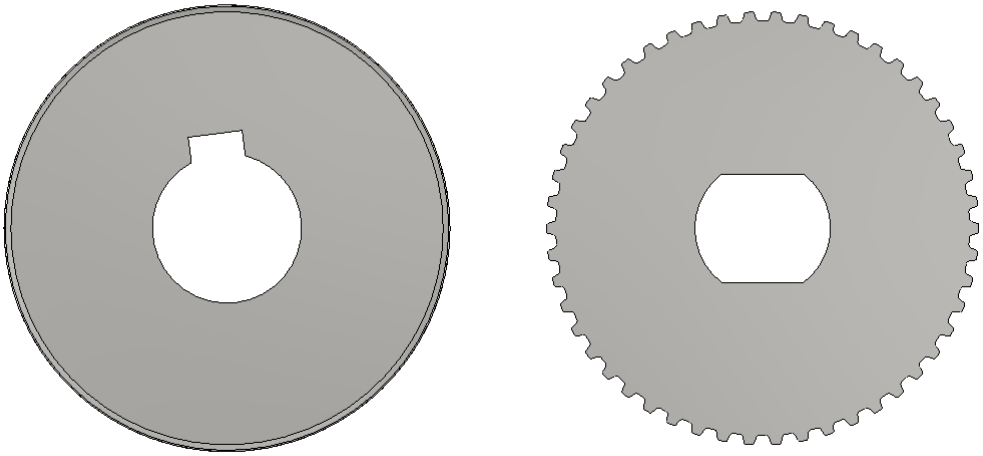
Na obr. 26 můžeme vidět již ukotvený mechanismus na rám manipulátoru. Celý mechanismus se skládá z jednoho synchronního řemene, čtyř „pevných“ ozubených řemenic v rozích manipulátoru, dvě z těchto řemenic jsou hnané a příslušnými kombinacemi rotací zajišťují pohyb manipulátoru v osách X a Y do jakýchkoliv koordinací v pracovním prostoru v dané rovině. Poté jsou zde čtyři „volné“ hladké řemenice, jež jsou upevněny na jezdcích vedení osy Y.

Všechny tyto řemenice jsou propojeny jedním synchronním řemenem s otevřenými konci. Tyto konce jsou upevněny pomocí aretačních šroubů do mechanismu s koncovým efektorem, tedy v našem případě do konstrukčního uzlu, jež má na starosti pohyb v ose Z.



Obr. 27 H-bot mechanismus (volné řemenice modře; pevné řemenice červeně)

Výkon je přenášen pomocí tvarového styku. V hnaných řemenicích pomocí náboje s perem, hnané řemenice přenáší moment pomocí vyfrézovaných plošek na hřídeli (viz. Obr.28).



Obr. 28 Hnací řemenice (vlevo) a Hnaná řemenice (vpravo)

Na obr. 29 můžeme vidět řešení upnutí hnané řemenice. Abychom zamezili vypadnutí z hřídele, tak je zde přišroubována přidržovací destička.

Obr. 29 Upevnění hnané řemenice a servomotoru

4.5 Řešení předpětí řemenu

Aby řemen správně fungoval (nepřeskakovali zuby, neprověsil se řemen apod.), tak musí být předepjatý určitou silou F_u. Předpětí řemenu se dá zajistit několika způsoby. Například korekcí osové vzdálenosti řemenic, nebo napínací kladkou. V naší konstrukci jsme zvolili možnost

korekce. Servomotor se místo do přesných děr montuje do drážek, tudíž můžeme kdykoliv mírně korigovat osovou vzdálenost.

5 VÝPOČETNÍ ČÁST

V této části práce se zaměříme na výpočty parametrů vybraných konstrukčních uzlů, sílu ve větvích řemenu, předpětí řemenu.

5.1 Výpočet velikostí řemenic

Jelikož chceme zanechat stejné rychlosti ve všech bodech řemenu, tak uvažujeme že převodový poměr řemenových převodů je roven jedné.

$$i = \frac{D_w}{d_w} \; [11]$$

$$D_w = i \cdot d_w$$

$$D_w = d_w$$

Velikost řemenic se odvíjí od zadané rychlosti pohybu, tedy:

$$v = \pi \cdot d_w \cdot n_d \;\; [m/s] \; [11]$$

Z předchozí rovnice si vyjádříme průměr malé řemenice d_w.

$$d_w = \frac{v}{\pi \cdot n_d}$$

Z technického listu vybraného motoru zjistíme dosahované otáčky motoru.

$$n_d = 3000 \; ot/min$$

$$n_d = \frac{3000}{60} = 50 \; ot/s$$

Ze zjištěných parametrů vypočítáme průměry řemenic.

$$d_w = \frac{5}{\pi \cdot 50}$$

$$d_w = 0.03183 \; m = 31.83 \; mm$$

$$D_w = i \cdot d_w$$

$$D_w = 1 \cdot 31.83 = 31.83 \; mm$$

5.2 Výpočet sil ve větvích řemene a předpětí

Jelikož známe výkon motoru, jeho maximální otáčky a točivý moment, tak jsme schopni zjistit sílu působící v řemenu.

$$M = F \cdot r_w$$

$$F = \frac{M}{r_w} = \frac{0{,}64}{\frac{31{,}8 \cdot 10^{-3}}{2}}$$

$$F = 40{,}25 \; N$$

Pro výpočet předpětí potřebujeme zjistit následující:

$$\Delta F = \frac{2 \cdot M}{d_w} = F_1 - F_2 \ [11]$$

$$\Delta F = \frac{2 \cdot 0{,}64}{31{,}83 \cdot 10^{-3}} = 40{,}2 \ N$$

$$F_1 = \Delta F + F_2 = 40{,}2 + 40{,}25$$

$$F_1 = 80{,}45 \ N$$

Dále víme že:

$$F_1 + F_2 = 2 \cdot F_u + 2 \cdot F_c \ [11]$$

$$F_c = \rho_L \cdot r_w^2 \cdot v^2 = \rho_L \cdot v^2$$

Délku řemene a jeho hmotnost víme z modelu:

$$\rho_L = \frac{m}{L} = \frac{0{,}014}{5} = 2{,}8 \cdot 10^{-3} \ kg/m$$

$$F_c = 2.8 \cdot 10^{-3} \cdot 5^2 = 0.07 \ N$$

Poté si můžeme vyjádřit sílu předpětí F_u:

$$F_u = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c$$

$$F_u = 60{,}28 \ N$$

Pro správnou funkci řemenu jej musíme předepnout na 60,28N.

5.3 Statické výpočty

V této podkapitole se budeme věnovat statickým kontrolním výpočtům konstrukce.

5.3.1 Nosnost vedení v ose Y

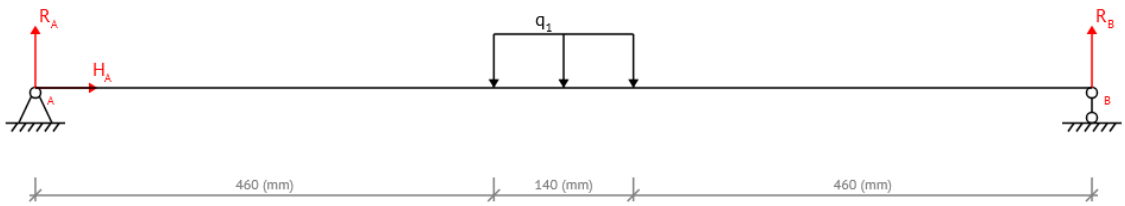
Vedení v ose Y je tvořeno vodící tyčí W 18h6 Cf53 [20].

Výpočtové parametry

$$Re_{Cf53} = 430 \ MPa \ [25]$$

$$k_{ny} = k_{nx} = 2$$

Modelování úlohy a výpočet reakcí



Obr. 30 Uvolnění vedení v ose Y [25]

Liniové zatížení q opět reprezentuje zatížení od dalšího konstrukčního uzlu. Jedná se o zatížení od vedení osy Z.

$$F_{qy} = F_g$$

$$q \cdot 140 = m_{ky} \cdot g$$

$$q = \frac{m_{ky} \cdot g}{140}\ N/mm$$

Poté sestavíme rovnice statické rovnováhy a vypočteme reakční síly:

$$\sum F_x = 0\ ; H_A = 0$$

$$\sum F_y = 0\ ;\ R_A - F_q + R_B = 0$$

$$R_B = F_q - R_A$$

$$\sum M_{Bz} = 0\ ;\ R_A \cdot 1060 - F_q \cdot \left(530 + \frac{140}{2}\right) = 0$$

$$R_A = \frac{F_q \cdot \left(460 + \frac{140}{2}\right)}{1060} = \frac{m_{ky} \cdot g \cdot 530}{1060} = \frac{1}{2} \cdot m_{ky} \cdot g$$

$$R_B = m_{ky} \cdot g - \frac{1}{2} \cdot m_{ky} \cdot g = \frac{1}{2} \cdot m_{ky} \cdot g$$

Následovně si vyjádříme výsledné vnitřní účinky (VVÚ), kde opět postupujeme zleva:

Pro první řez tedy poté platí:

$$x_{1y} \epsilon \langle 0; 460 \rangle$$

$$N_1 = -H_A = 0$$

$$T_1 = R_A$$

$$M_{o1} = R_a \cdot x_{1y}$$

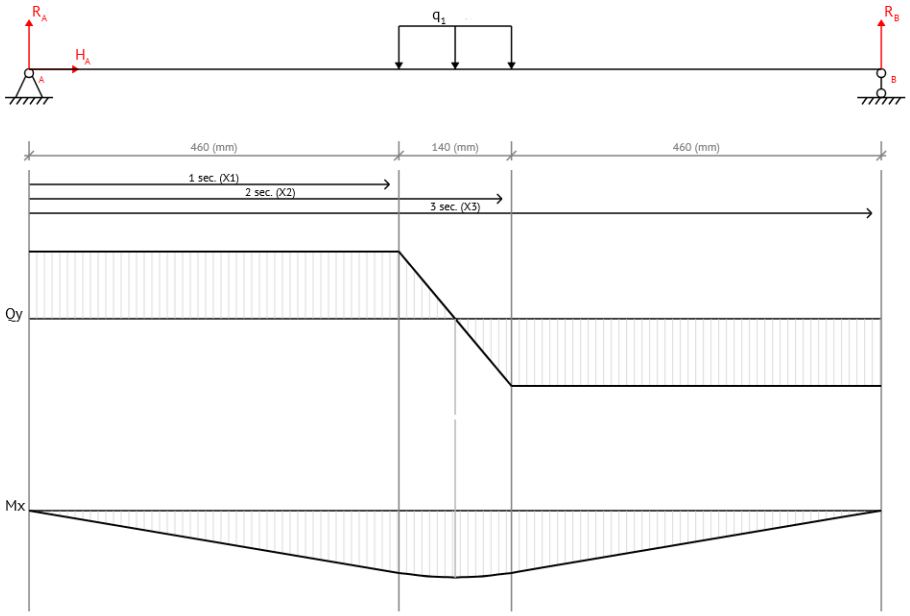
Pro druhý řez platí:

$$x_2 \epsilon \langle 0; 140 \rangle$$

$$N_2 = -H_A = 0$$

$$T_2 = R_A - q \cdot x_2$$

$$M_{o2} = R_A \cdot (460 + x_2) - q_1 \cdot \frac{x_2^2}{2}$$



Obr. 31 Grafické znázornění VVÚ pro vedení osy Y (vliv posouvající síly a ohybového momentu) [25]

Pomocí grafického znázornění výsledných vnitřních účinků určíme nebezpečné místo (inflexní bod), jež se nachází uprostřed konstrukce. V tomto bodě působí maximální ohybový moment:

$$x_2 = 70\ mm$$

$$M_{o2} = R_A \cdot (460 + 70) - q \cdot \frac{70^2}{2}$$

$$M_{o,max,y} = \frac{1}{2} \cdot m_{ky} \cdot g \cdot (460 + 70) - \frac{m_{ky} \cdot g}{140} \cdot \frac{70^2}{2}$$

$$\mathrm{M_{o,max,y}} = \mathrm{m_{ky}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \mathrm{g} \cdot 530 - \frac{70^2 \cdot \mathrm{g}}{280} \right)$$

Poté si vyčíslíme ohybový moment pomocí návrhového součinitele k_{ny}:

$$k_{ny} = \frac{Re_{Cf53}}{\sigma_{o,max}} \rightarrow \sigma_{o,max} = \frac{Re_{Cf53}}{k_{ny}}$$

$$\sigma_{o,max} = \frac{M_{o,max,y}}{W_o} = \frac{M_{o,max,y}}{\frac{J_y}{\rho}} = \frac{M_{o,max,y}}{\frac{\pi \cdot d^4}{\frac{64}{\frac{d}{2}}}} = \frac{M_{o,max,y}}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{32 \cdot M_{o,max,y}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\frac{Re_{Cf53}}{k_{ny}} = \frac{32 \cdot M_{o,max,y}}{\pi \cdot d^3}$$

$$M_{o,max,y} = \frac{Re_{Cf53} \cdot \pi \cdot d^3}{32 \cdot k_{ny}} = \frac{430 \cdot \pi \cdot 18^3}{32 \cdot 2} = 123099.38\ N \cdot mm$$

Následně jsme si vyjádřili maximální nosnost tohoto konstrukčního uzlu:

$$M_{o,max,y} = m_{ky} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot g \cdot 530 - \frac{70^2 \cdot g}{280} \right)$$

$$m_{ky} = \frac{M_{o,max,y}}{\left(\frac{1}{2} \cdot g \cdot 530 - \frac{70^2 \cdot g}{280}\right)} = \frac{123099.38}{\left(\frac{1}{2} \cdot 9.81 \cdot 530 - \frac{70^2 \cdot 9.81}{280}\right)}$$

$$m_{ky} = 50{,}7\ kg$$

Maximální možná nosnost tohoto uzlu je tedy 109.11 kg. Váha zařízení nošena tímto uzlem činí:

$$m_{konstrukce,y} = 11{,}317\ kg$$

$$m_c = m_{konstrukce,x} + m_n = 11{,}317 + 0.5 = 11{,}817\ kg$$

$$m_c < m_{ky}$$

Statický pevnostní výpočet vyhovuje.

5.3.2 Nosnost vedení osy X

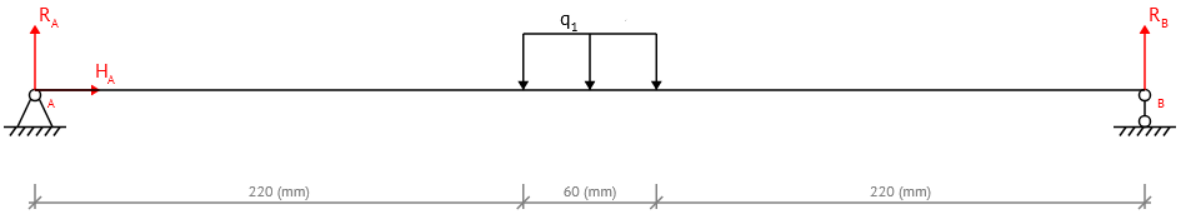
Vedení v ose X je tvořeno vodící tyčí W 18h6 Cf53 [20].

Výpočtové parametry

$$Re_{Cf53} = 430\ MPa\ \ [25]$$

$$k_{ny} = k_{nx} = 2$$

Modelování úlohy a výpočet reakcí



Obr. 32 Schéma zatížení vedení v ose Y [25]

Liniové zatížení q opět reprezentuje zatížení od dalšího konstrukčního uzlu, tentokrát však pouze zatížení od vedení osy Z.

$$F_{qx} = F_g$$

$$q \cdot 60 = m_{kx} \cdot g$$

$$q = \frac{m_{kx} \cdot g}{60}\ N/mm$$

Poté opět sestavíme rovnice statické rovnováhy a vypočteme reakční síly:

$$\sum F_x = 0\ ; H_A = 0$$

$$\sum F_y = 0\ ;\ R_A - F_q + R_B = 0$$

$$R_B = F_q - R_A$$

$$\sum M_{Bz} = 0\ ;\ R_A \cdot (220 + 60 + 220) - F_q \cdot \left(220 + \frac{60}{2}\right) = 0$$

$$R_A = \frac{F_q \cdot \left(220 + \frac{60}{2}\right)}{220 + 60 + 220} = \frac{m_{kx} \cdot g \cdot 250}{500} = \frac{1}{2} \cdot m_{kx} \cdot g$$

$$R_B = m_{kx} \cdot g - \frac{1}{2} \cdot m_{kx} \cdot g = \frac{1}{2} \cdot m_{kx} \cdot g$$

Následovně si vyjádříme výsledné vnitřní účinky (VVÚ), kde opět postupujeme zleva:

Pro první řez tedy platí:

$$x_{1y} \epsilon \langle 0; 220 \rangle$$

$$N_1 = -H_A = 0$$

$$T_1 = R_A$$

$$M_{o1} = R_a \cdot x_{1x}$$

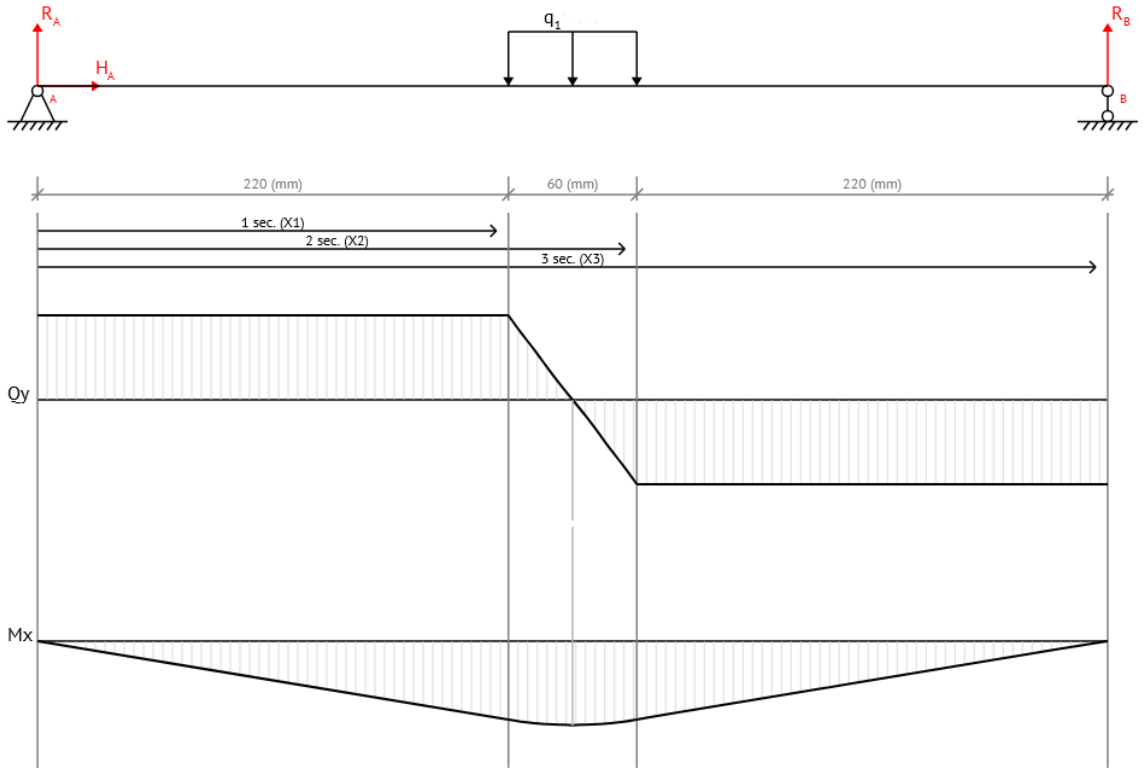
Pro druhý řez platí:

$$x_2 \epsilon \langle 0; 60 \rangle$$

$$N_2 = -H_A = 0$$

$$T_2 = R_A - q \cdot x_2$$

$$M_{o2} = R_A \cdot (220 + x_2) - q_1 \cdot \frac{x_2^2}{2}$$



Obr. 33 Grafické znázornění VVÚ pro vedení osy Y (vliv posouvající síly a ohybového momentu) [25]

Pomocí grafického znázornění výsledných vnitřních účinků určíme nebezpečné místo (inflexní bod), jež se opět nachází uprostřed konstrukce. V tomto bodě působí maximální ohybový moment:

$$x_2 = 30\ mm$$

$$M_{o2} = R_A \cdot (220 + 30) - q \cdot \frac{30^2}{2}$$

$$M_{o,max,x} = \frac{1}{2} \cdot m_{kx} \cdot g \cdot (220 + 30) - \frac{m_{kx} \cdot g}{60} \cdot \frac{30^2}{2}$$

$$\mathrm{M_{o,max,x}} = \mathrm{m_{kx}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \mathrm{g} \cdot 250 - \frac{30^2 \cdot \mathrm{g}}{120} \right)$$

Poté si opět vyčíslíme ohybový moment pomocí návrhového součinitele k_{ny}:

$$k_{nx} = \frac{Re_{Cf53}}{\sigma_{o,max}} \rightarrow \sigma_{o,max} = \frac{Re_{Cf53}}{k_{ny}}$$

$$\sigma_{o,max} = \frac{M_{o,max,x}}{W_o} = \frac{M_{o,max,x}}{\frac{J_x}{\rho}} = \frac{M_{o,max,x}}{\frac{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}{\frac{d}{2}}} = \frac{M_{o,max,x}}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{32 \cdot M_{o,max,x}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\frac{Re_{Cf53}}{k_{nx}} = \frac{32 \cdot M_{o,max,x}}{\pi \cdot d^3}$$

$$M_{o,max,x} = \frac{Re_{Cf53} \cdot \pi \cdot d^3}{32 \cdot k_{nx}} = \frac{430 \cdot \pi \cdot 18^3}{32 \cdot 2} = 123099.38\ N \cdot mm$$

Následně jsme si vyjádřili maximální nosnost tohoto konstrukčního uzlu:

$$M_{o,max,x} = m_{kx} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot g \cdot 250 - \frac{30^2 \cdot g}{120} \right)$$

$$m_{kx} = \frac{M_{o,max,x}}{\left(\frac{1}{2} \cdot g \cdot 250 - \frac{30^2 \cdot g}{120} \right)} = \frac{123099.38}{\left(\frac{1}{2} \cdot 9.81 \cdot 250 - \frac{30^2 \cdot 9.81}{120} \right)}$$

$$m_{kx} = 106{,}8\ kg$$

Maximální možná nosnost tohoto uzlu je tedy 109.11 kg. Váha zařízení nošena tímto uzlem činí:

$$m_{konstrukce,x} = 7.632\ kg$$

$$m_c = m_{konstrukce,x} + m_n = 7.413 + 0.5 = 8{,}132\ kg$$

$$m_c < m_{kx}$$

Pevnostní výpočet vyhovuje.

6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole se zaměříme na odhad ceny našeho návrhu.

Tabulka 5 Výpis nákladů na nákup materiálu na výrobu manipulátoru

Nakupované díly	Tržní cena bez DPH	Tržní cena s DPH
3x Servomotor SMARTSTEP2 [16]	50 685.39 Kč	61 329.33 Kč
8x Kluzné pouzdro SKF PCM 182025 M [26]	334,4 Kč	404,64 Kč
7x Jednořadé kuličkové ložisko SKF 6000 – ZTN9/LT [27]	2 228,8 Kč	2 696,82 Kč
4,436m Jakl 40x4 [28]	534,27 Kč	646,46 Kč
3,12m Vodící tyče pr. 18h6 [20]	310 Kč	375,10 Kč
0,41m Vodící tyče pr. 4h6 [29]	1 086,91 Kč	1 315,16 Kč
10x pryžové dorazy [30]	47 Kč	56,9 Kč
2x MGN12 [22]	1 020 Kč	1 234 Kč
Celkem	**56 246,77 Kč**	**68 058,41 Kč**

Odhadovaná cena konstrukčního materiálu pro konstrukci našeho manipulátoru je 68 058,41 Kč včetně DPH. Avšak zde nejsou započítané náklady na zpracování, montáž, drobný materiál jako šrouby, nýty, cena za zpracování a výrobu řemenic apod. tudíž cena na výrobu bude mnohem vyšší.

Cena návrhu však nespočívá pouze v materiálu, do cenové kalkulace se musí započítat i vývoj prototypu, patentová rešerše.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce byla provést rešerši okolo manipulačních zařízení, konstrukce vysokorychlostního kartézského manipulátoru typu H-bot, provedení potřebných výpočtů a vytvoření výkresové dokumentace sestavy a vybraných dílů.

V této práci byl proveden návrh manipulátoru typu H-bot, s ohledem na velikost pracovního prostoru, rychlosti a nosnosti. V rešeršní části je shrnuto kompletní rozdělení manipulátorů, od manuálních až po moderní automatizované manipulátory.

Během multikriteriální analýzy jsme analyzovali tři konstrukční varianty H-botu. H-bot, CoreXY a CoreH-bot. Po dokončení analýzy jsme vybrali konstrukci obyčejného H-botu, který sice má své nedostatky, ale s ohledem na potřebná kritéria to byla nejlepší volba a to především díky nižší ceně, jednoduchosti konstrukce a montáže.

Ve výpočtové části jsme se zaobírali návrhem parametrů řemenic, pohonu, výpočtem předpětí a celkové únosnosti konstrukčních uzlů, ve které jsme byly s přehledem na bezpečné straně, proto by se dalo ještě dále optimalizovat, aby se snížily celkové náklady na materiál a tím pádem i celého stroje.

Následovalo ekonomické zhodnocení, ve kterém jsme si shrnuli náklady za hrubý materiál a další možné náklady při vývoji takového zařízení.

Manipulátory H-bot mají největší využití u aditivních technologií, kde je to nejvíce rozšířeným způsobem ovládání pohybu jednotlivých os. Tato konstrukce má však i mnoho jiných využití. Používá se i například pro pozicování rentgenových zařízení, má tedy velké využití ve farmaceutickém průmyslu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1] B.-Z. Sandler, Robotics: Designing the Mechanisms for Automated Machinery, 2nd Edition editor, San Diego, California: Academic Press, 1999, pp. 12-20.

2] R. C. Goertz, „Cybernetic Zoo," [Online]. Available: https://cyberneticzoo.com/teleoperators/1954-electromechanical-manipulator-ray-goertz-american/attachment/manipulator-1948-anl-mod1-x640/.

3] Z. a. k. Kolíbal, Roboty a Robotizované Výrobní Technologie, Z. Kolíbal, P. Blecha, R. Blecha, F. Bradáč, L. Kárník, R. Knoflíček, T. Kubela, A. Pochylný a V. Singule, Editoři, Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladelství VUTIUM, 2016.

4] „Unity Medical Centre," Unity Medical Centre, [Online]. Available: https://www.unitymedcenter.com/hospital/davinci-surgical-system.html. [Přístup získán Únor 2025].

5] B. Coxworth, „Surgical robot provides haptic feedback to users," *New Atlas,* 9 Říjen 2010.

6] A. Elfasakhany, E. Yanez, K. Baylon a S. Ricardo, „Research Gate," 1 Leden 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Work-region-of-the-robotic-arm_fig12_268437501. [Přístup získán Duben 2025].

7] M. W. Jasim, „Solution of Inverse Kinematics for SCARA Manipulator Using Adaptive Neuro-Fuzzy Network," *International Journal on Soft Computing,* p. 61, Listopad 2011.

8] „Beckhoff," Beckhoff Automation s.r.o., [Online]. Available: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tckintransformation/1027789963.html&id=. [Přístup získán Únor 2025].

9] „Circuit Digest," 24 Srpen 2015. [Online]. Available: https://circuitdigest.com/article/what-are-industrial-manipulators. [Přístup získán Únor 2025].

10] S. Thorat, „LearnMech," [Online]. Available: https://learnmech.com/cylindrical-robot-diagram-construction-applications/. [Přístup získán 12 Únor 2025].

11] G. R. Budynas a K. J. Nisbett, Shigleyho konstruování strojních součástí, první vydání editor, M. Hratl a M. Vlk, Editoři, Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2023.

12] „Pikron," Pikron s.r.o., [Online]. Available: https://www.pikron.cz/blog/jak-spravne-identifikovat-klinovy-remen. [Přístup získán únor 2025].

„Pikron,“ Pikron s.r.o., [Online]. Available: https://www.pikron.cz/ozubene-
13] remeny. [Přístup získán Březen 2025].

„Bando,“ Bando, [Online]. Available:
14] https://bando.de/en/product/industry/timing-belts/synchronous-belts-endless/. [Přístup získán Únor 2025].

E. Idà, F. Nanetti a G. Mottola, „An Alternative Parallel Mechanism for
15] Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D Printer,“ *Machines,* 4 Červenec 2022.

„RS,“ [Online]. Available: https://cz.rs-
16] online.com/web/p/servomotory/1241296. [Přístup získán Březen 2025].

„VPB Pevné zavěšení vakuových přísavek,“ Elesa+ Ganter CZ s.r.o., [Online].
17] Available: https://www.elesa-ganter.cz/cs/cze/vakuove-komponenty--pevne-zav%C4%9B%C5%A1eni-vakuovych-p%C5%99isavek--vpb-f#categoryid=697505&sortby=0&facetvalue=697507&facetcodevalue=&searchtopcategoryid=12501&searchparentcategoryid=697505. [Přístup získán 20 May 2026].

„VVA-27 Ploché vakuové přísavky s hrdlem,“ Elesa + Ganter CZ s.r.o.,
18] [Online]. Available: https://www.elesa-ganter.cz/cs/cze/vakuove-komponenty--ploche-vakuove-p%C5%99isavky-s-hrdlem--vva-27-t-a#categoryid=697505&sortby=0&facetvalue=697506,-700000000000012350471324947 52&facetcodevalue=. [Přístup získán 20 May 2026].

„SKF,“ SKF, [Online]. Available:
19] https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6000-ZTN9%2FLT. [Přístup získán Únor 2025].

„Exvalos: Ložiska a Příslušentství,“ Exvalos, [Online]. Available: https://e-
20] shop.exvalos.cz/produkty/detail/14002/tyc-w-18h6-cf53-vodici-tyc-ocelova-ljma-18h6. [Přístup získán Duben 2025].

„SKF,“ SKF, [Online]. Available: https://www.skf.com/group/products/plain-
21] bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20182025%20M. [Přístup získán Únor 2025].

„Drátek.cz,“ [Online]. Available: https://dratek.cz/arduino-platforma/148387-
22] kolejnice-linearniho-vedeni-s-vozikem-mgn12-delka-300-mm.html. [Přístup získán 14 May 2026].

„Ball screw 1605 dimensions and specifications (ball screw),“ [Online].
23] Available: https://en.ast3d.com.ua/info/ball-screw-1605-dimensions. [Přístup získán 16 May 2026].

„SKF,“ SKF, [Online]. Available: https://www.skf.com/cz/products/plain-
24] bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20040510%20E%2FVB055. [Přístup získán 20 May 2026].

WSB: Westfälisches Schäl & Blankstahlzentrum, [Online]. Available:
25] https://wsb-gmbh.eu/produkte/cf53/. [Přístup získán Duben 2025].

[26] „Mateza,“ Mateza, [Online]. Available: https://www.mateza.cz/e-shop/kluzne-pouzdro-skf-pcm-182025-m. [Přístup získán Květen 2025].

[27] „Mateza,“ Mateza, [Online]. Available: https://www.mateza.cz/e-shop/lozisko-skf-6001-ztn9-lt. [Přístup získán Květen 2025].

[28] „Atreon,“ Atreon, [Online]. Available: https://www.atreon.cz/jekl-40x40x4/. [Přístup získán May 2026].

[29] „Arkov,“ Arkov, [Online]. Available: https://www.arkov.cz/p/tyc-w-4-h6-cf53-ocelova-vodici-tyc-ina-216387. [Přístup získán 20 May 2026].

[30] „Mateza,“ Mateza, [Online]. Available: https://www.mateza.cz/e-shop/pryzovy-doraz-nastrcny-do-diry-8-mm-dn-1408-2-5. [Přístup získán 20 May 2026].

[31] „Tyma,“ Tyma, [Online]. Available: https://www.tyma.cz/produkty/2384-mxl-019-neopren/. [Přístup získán Březen 2025].

[32] „Mateza,“ Mateza, [Online]. Available: https://www.mateza.cz/e-shop/lozisko-skf-623. [Přístup získán Květen 2025].

[33] „Beam Guru,“ [Online]. Available: https://beamguru.com/online/beam-calculator/. [Přístup získán Duben 2025].

[34] „Exvalos,“ Exvalos ložiska a příslušenství, [Online]. Available: https://www.arkov.cz/p/tyc-w-4-h6-cf53-ocelova-vodici-tyc-ina-216387. [Přístup získán 17 April 2025].

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam tabulek

Tabulka 1 Vybrané technické údaje běžně užívaných druhů řemenů [11] 17
Tabulka 2 Funkční plochy řemenic pro dané typy řemenů [11] 18
Tabulka 3 Vybrané technické údaje neoprenových ozubených řemenů s lichoběžníkovým tvarem zubů [11] 20
Tabulka 4 Hodnocení jednotlivých variant konstrukce mechanismu 24
Tabulka 5 Výpis nákladů na nákup materiálu na výrobu manipulátoru 41

9.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma teleoperátoru [2] 11
Obr. 2 Operační robot DaVinci [4] 12
Obr. 3 Operační robot Sofie [5] 13
Obr. 4 Pracovní prostor sférického manipulátoru [6] 14
Obr. 5 Cylindrický manipulátor a jeho pracovní prostor [7] 14
Obr. 6 Schéma robotu SCARA [8] 15
Obr. 7 Kartézský manipulátor a jeho pracovní prostor [9] 15
Obr. 8 Schéma kombinovaného cylindrického manipulátoru s lineárně koordinovaným manipulátorem [10] 16
Obr. 9 Průřezy řemenů. a) Plochý řemen; b) Kruhový řemen; c) Klínový řemen; d) Ozubený řemen 17
Obr. 10 Druhy klínových řemenů dle užití a tvaru [12] 18
Obr. 11 Druhy klínových řemenů dle provedení a technologie výroby [12] 19
Obr. 12 Záběr ozubeného řemenu [14] 19
Obr. 13 Schéma vedení typuy H-bot [15] 21
Obr. 14 Schéma vedení CoreXY [15] 22
Obr. 15 Schéma vedení CoreH-bot [15] 22
Obr. 16 Rám manipulátoru 25
Obr. 17 Vedení osy X a Y namontované v rámu 26
Obr. 18 Upevněný konstrukční uzel pro vedení v ose Z 26
Obr. 19 Jezdec osy Y 27
Obr. 20 Jezdec osy Y s hřídelemi 28
Obr. 21 Vedení osy Z (zavřené) 28
Obr. 22 Vedení osy Z (otevřené) 29
Obr. 23 Detail na mechanismus lineárního vedení osy Z 29
Obr. 24 Detail na vysunuté vedení osy Z 30
Obr. 25 Detail na kompozitní přímá pouzdra PCM 182025 M 30
Obr. 26 Ukotvený H-bot mechanismus (vyznačeno žlutě/červeně) 31
Obr. 27 H-bot mechanismus (volné řemenice modře; pevné řemenice červeně) 31
Obr. 28 Hnací řemenice (vlevo) a Hnaná řemenice (vpravo) 32
Obr. 29 Upevnění hnané řemenice a servomotoru 32
Obr. 30 Uvolnění vedení v ose Y [25] 34
Obr. 31 Grafické znázornění VVÚ pro vedení osy Y (vliv posouvající síly a ohybového momentu) [25] 36
Obr. 32 Schéma zatížení vedení v ose Y [25] 37
Obr. 33 Grafické znázornění VVÚ pro vedení osy Y (vliv posouvající síly a ohybového momentu) [25] 38

9.3 Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin

F_x , F_y , F_z	složky síly v osách
F_u	Síla předpětí
F_c	Tahová síla v řemenu od odstředivé síly
ΔF	Rozdíl sil ve větvích řemene
P_l	Délková hustota řemene
M_o	ohybový moment
σ_o	napětí v ohybu
R_A	reakční síla v bodě A
M_A	moment v bodě A
M	Točivý moment
i	převodový poměr
$x_{1,2}$	vzdálenost řezu při výpočtu VVÚ
k_n	návrhový součinitel, součinitel bezpečnosti
R_e	mez kluzu
$T_{1,2}$	posouvající síla
$N_{1,2}$	normálová síla
d_w	výpočtový průměr malé řemenice
D_w	Výpočtový průměr velké řemenice
r_w	Poloměr řemenice
W_o	modul průřezu v ohybu
J_y, J_x	osový kvadratický moment průřezu
VVÚ	výsledné vnitřní účinky
PRaM	průmyslové roboty a manipulátory

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres sestavy: BP-239204-1
Příloha 2	Výkres sestavy osy Z: BP-239204-2
Příloha 3	Výkres kotvy pro vedení osy Z: BP-239204-2-1
Příloha 4	Výkres kotvy pro kuličkový šroub: BP-239204-2-2
Příloha 5	Výkres vodící tyče osy Z: BP-239204-2-3
Příloha 6	Výkres kuličkového šroubu 1605: BP-239204-2-4
Příloha 7	Výkres kuličkové matice 1605: BP-239204-2-5
Příloha 8	Výkres kotevní desky efektoru: BP-239204-2-6