



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## DVOUOSÝ MANIPULÁTOR S VAKUOVÝM UPÍNÁNÍM VZORKŮ

TWO-AXIS MANIPULATOR WITH VACUUM CLAMPING OF SAMPLES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Dokoupil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Prochazka, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Vojtěch Dokoupil</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>Ing. David Prochazka, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

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:

### Dvouosý manipulátor s vakuovým upínáním vzorků

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je integrace vakuového upínání vzorků na dvouosý manipulátor. Součástí práce bude konstrukční návrh manipulátoru a rešerše komerčně dostupných dvouosých manipulátorů. U komerčních řešení se bude zkoumat možnost integrace vakuového upínání, compatibility se současným laboratorním vybavením zejména z hlediska zástavbových rozměrů a dalších parametrů jako je rychlost a přesnost polohování (min 20 mm/s) a přesnost řízení (krok < 10 μm). Konstrukční návrh vakuového upínání bude zohledňovat dodržení předepsaných rovinností. Návrh systému musí splňovat požadavky na jednoduchou připojitelnost k vývěvě. Samotný systém upínání vzorků bude vybaven výměnným držákem pro přesně definované velikosti vzorků s identifikací pomocí elektronického obvodu.

#### Cíle bakalářské práce:

- Rešerše komerčně dostupných řešení.
- Návrh provedení vakuového upínání včetně kompletního konstrukčního návrhu
- Výkresová dokumentace a rozpočet

#### Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

SKAŘUPA, Jiří. Roboty a manipulátory I. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0044-6.

ONWUBOLU, Godfrey C. Mechatronics: principles and applications. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0750663793.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem dvouosého manipulátoru s vakuovým uchycením vzorků. Pro návrh byla zvolena lineární vedení, kuličkové šrouby a krokové motory. Součástí návrhu je také výpočet zatížení jednotlivých vozíků, únosnost kuličkových šroubů a zatížení krokových motorů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Dvouosý manipulátor, vakuové uchycení vzorků, kuličkový šroub, lineární vedení, krokový motor

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on design of a two-axis manipulator with vacuum attachment of samples. Linear guides, ball screws and stepper motors were chosen for the design. The design also includes calculation of the load on individual carts, the load capacity of ball screws and the load of stepper motors.

## **KEYWORDS**

Two-axis manipulator, vacuum attachment of samples, ball screw, linear guide, stepper motor

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DOKOUPIL, Vojtěch. *Dvouosý manipulátor s vakuovým upínáním vzorků*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140235>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce David Prochazka.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Procházky, Ph.D. a spoužitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 18. května 2022

.....

Vojtěch Dokoupil

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Patriku Cebovi za rady při výpočtech, Ing. Evženu Zobačovi za pomoc při návrhu modelu a Ing. Davidu Procházkovi, Ph.D. za rady při zpracování práce.

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Dostupná řešení na trhu .....	11
2.1	Dostupné manipulátory .....	11
2.1.1	Samostatné osy .....	11
2.1.2	Kompletní stoly .....	14
2.2	Zhodnocení nákladů .....	14
3	Komponenty používané v translačních mechanismech .....	15
3.1	Motory .....	15
3.1.1	Krokové motory .....	15
3.1.2	Servomotory .....	16
3.2	Vedení posuvu .....	18
3.2.1	Kluzné vedení .....	18
3.2.2	Valivé vedení .....	18
3.2.3	Výhody valivého lineárního vedení .....	19
3.3	Detekce polohy .....	20
3.3.1	Optická detekce polohy .....	20
3.3.2	Mechanická detekce polohy .....	21
3.4	Kuličkový šroub s maticí .....	22
4	Návrh dvouosého manipulátoru s vakuovým upínáním vzorků .....	24
4.1	Návrh osy X .....	24
4.1.1	Výběr lineárních vedení .....	24
4.1.2	Výběr kuličkového šroubu .....	26
4.1.3	Výběr motoru osy X .....	28
4.1.4	Popis konstrukce osy X .....	32
4.2	Návrh osy Y .....	33
4.2.1	Výběr lineárního vedení .....	33
4.2.2	Výběr kuličkového šroubu .....	35
4.2.3	Výběr motoru osy Y .....	38
4.2.4	Popis konstrukce osy Y .....	41
4.2.5	Čtečka držáků vzorků .....	42
4.2.6	Vakuové uchycení vzorků .....	42
4.3	Zhodnocení nákladů návrhu .....	44
5	Závěr .....	46

Seznam použitých zdrojů.....	47
Seznam použitých zkratek a symbolů .....	49
Seznam příloh.....	52
Seznam obrázků.....	53
Seznam tabulek.....	54

# 1 Úvod

Dvouosé manipulátory se využívají pro přesun měřeného vzorku nebo obráběného dílu. Pohyb jednotlivých os je obecně zajišťován elektromotory, jednou z možností pro přesné aplikace je využití krokových elektromotorů v kombinaci s kuličkovým šroubem a pohybovou maticí.

V úvodu práce jsou popsána komerčně dostupná řešení manipulátorů a případnou implementaci vakuového uchycení s ohledem na zástavbové rozměry.

Následující kapitoly jsou věnovány vlastnímu návrhu manipulátoru s vakuovým uchycením vzorků s výpočty pro potřebnou rychlost a přesnost posuvu jednotlivých částí. Důležitou částí je volba kuličkového šroubu, aby vydržel dynamické zatížení kroutícím momentem krokového motoru a volba dostatečného krokového motoru v závislosti na přesouvané hmotnosti jednotlivých os. Vlastní návrh řešení obsahuje samotný návrh možného řešení manipulátoru s jednoduchým připojením na vakuový systém ve 3D softwaru Inventor spolu s modelem.

## 2 Dostupná řešení na trhu

Kapitola se zabývá komerčně dostupnými řešeními různých manipulátorů a případnou implementací vakuového upínání. Mezi komerčně dostupné řešení bude bráno i složení manipulátoru z jednotlivých předem složených částí os.

### 2.1 Dostupné manipulátory

V současné době se vyskytuje mnoho různých řešení pro dvouosý lineární posun od možného nákupu samostatně složených os a následného jejich spojení až po kompletní stoly.

#### 2.1.1 Samostatné osy

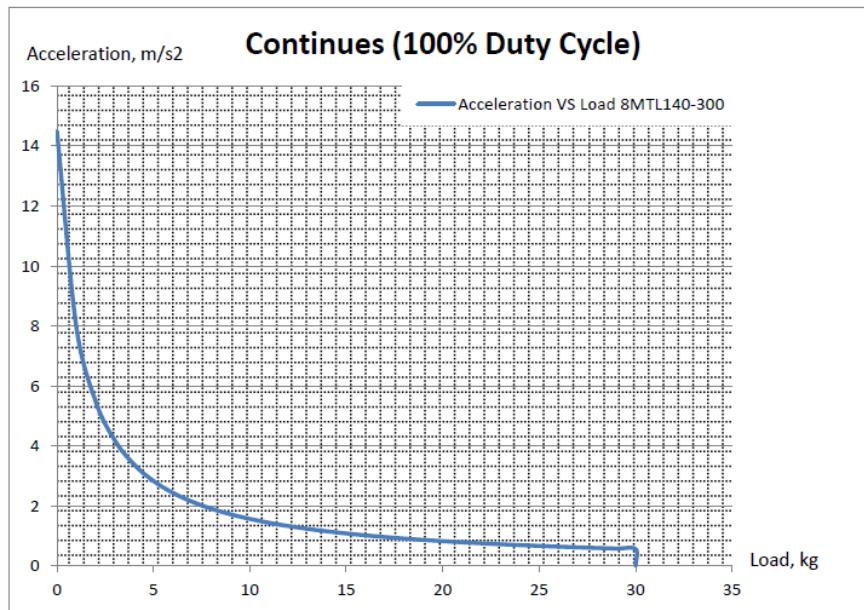
Předem zkompletované osy jsou nákladnějším řešením, zvláště pro přesnější posuv s větší celkovou délkou. Samostatným osám se věnuje například firma Standa, která má široký výběr a jejich řešení lze používat i ve vakuu, ovšem to se pak odráží na vyšší ceně. Rozsah os se pohybuje od 13 mm až po 1000 mm s maximální nosností 100 kg s ochranou proti prachu. Pro požadavky minimálního celkového posuvu jednotlivé osy 210 mm je vhodný typ 8MTL1401-300, který má rozsah až 300 mm, s přesností před kalibrací 5  $\mu\text{m}$  a po kalibraci dosahující až 1  $\mu\text{m}$ , maximální nosností 30 kg a při zatížení 4 kg maximální rychlost <2000 mm/s. [1]



Obrázek 1: Motorizovaná osa výrobce Standa 8MTL1401-300

Pro posun ve dvou osách lze jednotlivé moduly na sebe snadno uchytit pomocí 4 šroubů. Takové řešení je šetrné z hlediska zástavby, protože jeden modul má celkovou výšku 55 mm. Samotné posouvací moduly by tak dosahovaly výšky 110 mm. Následně by se na základnu stupně musel upevnit obrobek, který by sloužil jakožto základna pro elektroniku čtečky vyměnitelných držáků vzorků, samotný mechanismus upínání držáků vzorků a přívod vývěvy pro vakuové ukotvení vzorků.

V následujícím grafu 1 je ukázáno maximální zrychlení v závislosti na zatížení jedné osy.



Graf 1: Závislost zrychlení na zátěži osy 8MTL1401-300 [1]

Uvažujeme dolní stupeň (dále označováno jako stage) manipulátoru při použití dvou těchto os. Přičemž zatížení vzorkem bude maximálně 3 kg, maximální hmotnost vyměnitelného úchytu vzorků 0,5 kg, odhadovaná hmotnost základny pro elektroniku čtečky 1 kg a hmotnost druhé upevněné osy 6,5 kg dostáváme celkové zatížení 11 kg. Danému zatížení odečteme hodnotu zrychlení z grafu (Graf 1), která odpovídá přibližně  $1,8 \text{ mm/s}^2$ . Z rovnice pro rychlost rovnoměrně zrychleného pohybu (51) spočítáme za jak dlouhou dobu se dostaneme na požadovanou rychlost  $20 \text{ mm/s}$  a jakou dráhu při tom urazí. Počáteční rychlost  $v_0 = 0 \text{ m/s}$ . [1]

$$v = v_0 + a \cdot t \quad (1)$$

$$t = \frac{v}{a} = \frac{20}{1,8} \doteq 11,1 \text{ s} \quad (2)$$

$$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,8 \cdot 11,1^2 = 110,9 \text{ mm} \quad (3)$$

Z rovnic je patrné, že požadované rychlosti bychom dosáhli po necelých 111 mm. Délka i doba pro dosažení požadované rychlosti by šla snížit změnou motoru za výkonnější. Tato změna se při předem smontovaných stupňů nedá uplatnit kvůli větším zástavbovým rozměrům výkonnějšího motoru a předem definovaným vnitřním rozměrům sestavy.

Dalším možným prodejcem je firma Zaber, která se zabývá nejen lineárními posuvy, ale taky velkou škálou krokových motorů, optických úchytů, mikromanipulátorů a aplikací pro vysoké (HV) i nízké (LV) vakuum. Jakožto nejvhodnější řešení, které by částečně splňovalo požadavky je stage s označením X-LRT0250AL-AE53C.



Obrázek 2: stage X-LRT0250AL-AE53C

Tato jednotka má oproti předchozí nižší hmotnost 4,4 kg a větší možné zatížení až 2940 N (necelých 300 kg), ale má menší přesnost co se týče posuvu s odchylkou 20  $\mu\text{m}$  při přesouvání mezi dvěma body z jednoho směru. Tento typ se pohybuje v cenové kategorii od 4 300 € (103 695 Kč) výše což by celkovou cenu manipulátoru výrazně navýšilo. [2]

Firm na trhu, které se zabývají motorizovanými lineárními posuvy je velké množství. Za zmínku stojí také firma Thorlabs, která se zabývá i optickými komponenty. Cenové rozpětí se velmi podobá firmě Zaber s cenou pro servomotorem poháněný stupeň s rozsahem 300 mm s označením DDS300 kolem 4 600 €. [2]



DDS300

Obrázek 3: Thorlabs DDS300

### 2.1.2 Kompletní stoly

Další možností realizace jsou předem zkompletované stolky umožňující pohyb ve dvou osách. Takové sestavy často využívají spojení dvou kusů jednoosých modulů z předchozí kapitoly nebo uložení lineárních vedení s vozíčky do monobloku a k pohybu se používají převážně krokové motory. Příkladem takové firmy je CactuX a jeho produkt SaguaroX.



Obrázek 4: CactuX SaguaroX M

Na obrázku 3 lze vidět, že je využito lineární vedení a všechny komponenty jsou obsaženy v hliníkovém monobloku, který jezdí v jedné ose jako celek. Řešení je velmi úsporné, co se týče zástavbových prostor. Hmotnost manipulátoru je 9 kg a maximální zatížení je 15 kg. Splňuje požadované podmínky na zatížení, avšak jeho maximální posuv je 100x100 mm a rychlost posuvu 10 mm/s. Tyto dvě vlastnosti nevyhovují pro požadované hodnoty a výrobce neuvádí s jakou přesností posuvu je daný manipulátor schopen pracovat. Výrobce uvádí převážně využití pro vycentrování vzorku a dálkové ovládání z vnějšku komory počítačové tomografie. [3]

Při použití takhle řešeného manipulátoru by bylo třeba přichytit základnu pro elektroniku čtečky a s redukcí pro přívod vývěvy pro uchycení vzorku. Za použití stejných hodnot hmotností jako v kapitole 2.1.1 bychom dostali, že maximální hmotnost vzorku, které bychom mohli upevnit je 13,5 kg což by bylo víc než dostatečné. [3]

## 2.2 Zhodnocení nákladů

V tabulce 1 jsou shrnuty ceny jednotlivých možností s přepočtem na Kč v kurzu 1 € = 24,67 Kč. Při použití komerčně dostupných řešení pro lineární posuv s požadovaný rozsahem a přesností by se cena pohybovala kolem 205 000 Kč jenom za předem smontované stupně, protože potřebujeme posuv ve dvou osách. Do nákladů by bylo třeba započítat obrobky pro úchyt vzorků, základnu, ve které by byla usazena čtečka držáků vzorků a rozbočovač pro napojení vývěvy. Celkové náklady by se tak mohly dostat na hodnotu kolem 220–230 tisíc jenom za komponenty.

Označení	cena za jednotku [€]	cena za jednotku [Kč]
8MTL1401-300	4 200,0 €	103 614,0 Kč
X-LRT0250AL-AE53C	4 300,0 €	106 081,0 Kč

Označení	Cena za jednotku [€]	Cena za jednotku [Kč]
DDS300	4 600,0 €	113 482,0 Kč
SaguaroX M	-	-

Tabulka 1: Ceny komerčního řešení

### 3 Komponenty používané v translačních mechanismech

V translačních mechanismech se používají komponenty, které převádí kroučící moment motoru na lineární posuv. Takovými součástmi jsou například lineární vedení s kuličkovým šroubem nebo přenos rotačního pohybu motoru pomocí ozubeného kola či šneku a hřebene.

#### 3.1 Motory

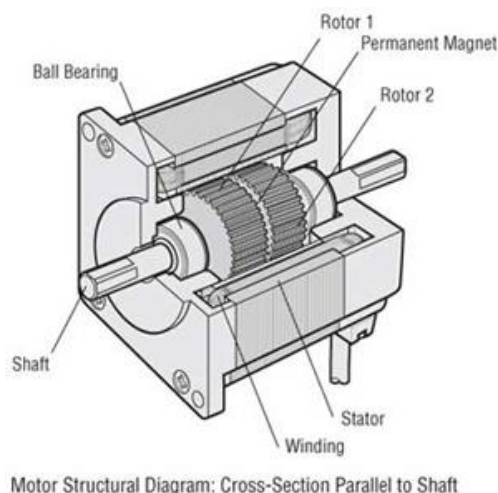
Pro pohyb manipulátorů se nejčastěji používají krokové motory kvůli jejich vyšší přesnosti kroku a možnosti mikrostepu při němž dojde k dosažení vyšší jemnosti kroku. V případech, kde není třeba tak vysoké přesnosti a je potřeba většího kroučícího momentu a otáček, se využívají servomotory. [4]

##### 3.1.1 Krokové motory

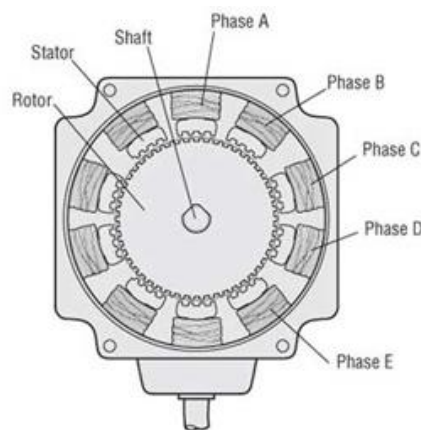
Krokový motor je synchronní stroj, který je ve většině případů napájen stejnosměrným proudem. Otáčky motoru jsou způsobeny změnou magnetického pole, které vychyluje rotor mezi statorem o tzv. krok. Jedná se o změnu stabilní polohy vyvolanou pulzem proudu. Při nízkých otáčkách se rotor pohybuje nespojitě. Počet kroků motoru je dán jeho konstrukcí a počtem pólových dvojic. [5] [6] [7]

K ovládní krokového motoru je vždy potřeba řídicí elektronika s ovladačem. Jedná se o elektrický obvod generující impulsy o určité délce. Frekvence a délka impulsů ovlivňuje směr a počet otáček rotoru. Úhel jednoho kroku motoru je určen počtem zubů na rotoru ( $N$ ) a počtem fází na statoru ( $m$ ). Při příchodu jednoho impulsu se motor otočí o jeden úhel kroku. Velikost kroku ve stupních lze vypočítat podle rovnice (4). [5] [6] [7]

$$\phi = \frac{360^\circ \cdot N}{m} \quad (4)$$



Obrázek 5: Řez krokovým motorem



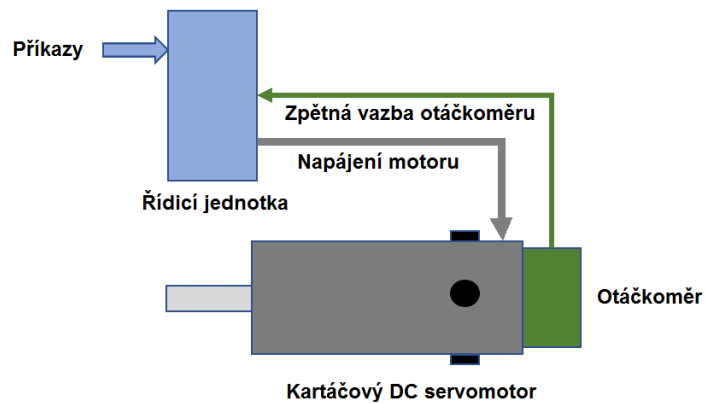
Obrázek 6: Vertikální řez vinutím krokového motoru

Motor se skládá ze dvou hlavních částí statoru a rotoru. Rotor je rozdělen na tři komponenty: rotor 1, rotor 2 a permanentní magnet, který ho magnetizuje v axiálním směru Obrázek 5. Pokud je rotor 1 magnetizován na severní pól, rotor 2 bude mít pól jižní. Na obou rotorech jsou zuby, které jsou od sebe vychýleny o šířku jednoho zubu. [5] [6] [7]

### 3.1.2 Servomotory

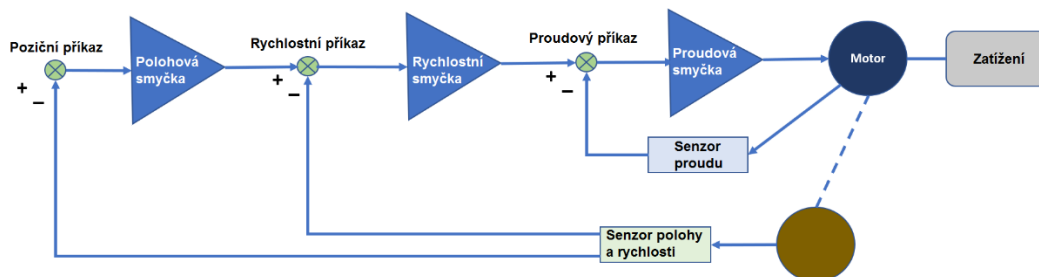
Výhoda servomotorů je v přesné kontrole polohy hřídele motoru a otáček a/nebo zrychlení. Jejich konstrukce umožňuje motor přetěžovat momentem a mohou být využity i jako brzdicí členy, kdy zpomalují pohyb. Konstrukce motoru je složena ze dvou částí – stator a rotor. Na rotoru se nacházejí permanentní magnety na hřídeli a na statoru jsou umístěny statorové plechy s drážkami pro statorové vinutí podobně jako u asynchronních motorů, nejčastěji bývá tří fázové. Motory jsou většinou napájeny třemi sinusovými signály proudů přivedenými na svorky. [4]

Motor obsahuje zpětnovazební zařízení, které poskytuje řídicí elektronice informace o rychlosti, poloze a proudu v motoru. Na základě získaných hodnot z motoru upravuje řídicí elektronika veličiny, aby dosáhla požadovaných otáček hřídele. [4]



Obrázek 7: Schéma řízení servomotoru

V řídicí jednotce může být nastavena požadovaná rychlost. Přes zpětnou vazbu tachometru osazeném na motoru vyhodnocuje, zda byla dosažena, pokud ne, dojde ke zvýšení výkonu motoru tak, aby při změně zatížení byla požadovaná rychlost konstantní. Jedná se o tzv. uzavřenou rychlostní smyčku. V některých servomotorech je integrováno několik zpětnovazebných smyček, aby byla zajištěno přesné řízení polohy. Systém se skládá z rychlostní, poziční a proudové smyčky. Každá smyčka sleduje příslušný prvek a vyhodnocuje ho tak, aby byla zajištěna korekce v reálném čase a bylo dosaženo požadovaných vstupních parametrů. [4]



Obrázek 8: Schéma zpětnovazebných smyček motoru

Hlavní smyčkou je proudová smyčka. V rotačním nebo lineárním motoru je proud lineárně úměrný krouticímu momentu na hřídeli. Snímač proudu poskytuje zpětnou vazbu ohledně proudu protékajícího motorem. Tato hodnota se odečte ve zpětnovazebné smyčce od požadované. Smyčka bude nasycena pokud dojde k vybudování servomotoru na požadovaný proud. Jestliže dojde k poklesu signálu ze senzoru proudu, bude smyčka zvyšovat proud, dokud opět neklesne pod nastavenou hodnotu. Tento cyklus se aktualizuje v jednotkách milisekund. [4]

## 3.2 Vedení posuvu

Lineární vedení zaručuje požadovaný směr pohybu soustavy, aby nedošlo k vyosení.

### 3.2.1 Kluzné vedení

Princip kluzného vedení zůstává dlouhou dobu neměnný. Jedná se o dvě plochy, které se po sobě smýkají. Tření je minimalizováno pomocí povrchové a tepelné úpravy a přidáním kluzného materiálu, který se při pohybu promazává. Snížení opotřebení ploch pomáhá jejich krytování, které zamezí vniknutí nečistot mezi plochy a jejich poškození. Kluzné vedení je tvořeno kalenou vodící plochou, nejlépe broušenou z jednoho kusu, na odlitku základny proti liště s lepenou kluznou hmotou. Po nalepení jsou do kluzné hmoty vybroušeny drážky pro ztrátové mazání. Drážka je seškrábána vůči broušené ploše, tím vzniknou kapsy pro zachycení mazacího oleje. Zatížení vedení je určeno délkou a šířkou kluzné plochy. Při větších rozměrech snese větší axiální i radiální zatížení. Vzniklá olejová vrstva tlumí nežádoucí vibrace a brání zadření. [4] [8]

Kluzná vedení mají ve srovnání s valivým vedením výhodu, že nedochází k přenosu vibrací, ale k jejich tlumení a mají větší únosnost zatížení v radiálním i axiálním směru. Výhodou je i menší servisní čas a cena na opravu, avšak nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady oproti lineárnímu vedení. Při vertikálních rychloposuvech dochází ke snížení rychlosti a plynulosti. Tento nedostatek lze odstranit použitím speciálních aditivních olejů. [4] [8]



Obrázek 9: Kluzné vedení HENNLICH

### 3.2.2 Valivé vedení

Kvůli zvyšujícím se nárokům na přesnost polohování a plynulost provozu se využívají valivá vedení. Skládají se převážně z lišty s drážkou a valivého bloku, kde jsou umístěny válečky nebo jiná valivá tělíska. Díky použití valivých komponent je docíleno snížení rozdílu statického a dynamického tření a plynulosti pohybu. Zatížení vedení určuje počet valivých tělísek ve valivém bloku. V současné době se nejčastěji používají valivé bloky s jehlovými tělísky, které umožňují vícebodový kontakt se stykovými plochami a tím i vyšší zatížení. [4] [8]



Obrázek 10: Příklad lineárního valivého vedení

Montáž lineárního vedení je jednodušší než kluzného a má výhodu možnosti předeprnutí a vymezení vůle vedení. Jelikož se součásti vedení dotýkají přes nepružný materiál (ocel), dochází k přenosu vibrací a při havárii k poškození samotného vedení. [4] [8]

Na trhu se vyskytují dva typy valivého vedení – s omezenou délkou zdvihu a s neomezenou délkou zdvihu. Pro kompenzaci axiálního zatížení je vhodné využít vedení s omezenou délkou zdvihu, označováno jako otevřené vedení. Je-li třeba přenášet libovolné zatížení je třeba využít tzv. uzavřené vedení, které jsou předeprnuté. Když se soustava pohybuje po celé délce vedení jedná se o vedení s neomezenou délkou zdvihu. Při pohybu po celé délce vedení obíhají valivé elementy uvnitř valivého bloku. Blok je připevněn k sestavě a pohybuje se po kolejnici, která je připevněna k loži nebo naopak. [4] [8]

### 3.2.3 Výhody valivého lineárního vedení

U valivého vedení se používají jako valivý prvek kuličky, které rotují v těle vozíku v uzavřených drahách. Dráhy mohou mít tvar „X“ nebo „O“. Na vozík tak při pohybu působí pouze valivé tření mezi kuličkami a kolejnici. V průmyslovém vedení se používají čtyři řady cirkulujících kuliček, které jsou uspořádány v konfiguraci „O“ a s kolejnici v bodě kontaktu svírají 45°. Takové uspořádání zaručuje vysokou tuhost a zatížitelnost vedení. [4] [8]

Výhodou valivého lineárního vedení je jednoduchá instalace, vysoká únosnost zatížení ve všech směrech, vysoká rychlost pohybu a potřeba malé hnací síly. Při instalaci se kolejnice opírá o vyvýšenou hranu což zajišťuje zvětšení tuhosti a stability vedení. Kolejnice se mohou uchytit spodním nebo vrchním úchytem. Díry mají mezi šrouby malou vůli a pro konečnou polohu se musí postupně dotahovat při pohybu vozíčku, aby došlo k přesnému ukotvení kolejnice. Takhle ukotvená kolejnice pak zaručuje plynulý chod. Pokud nebudou kolejnice při instalaci postupně dotahovány, může v některých místech pohybu dojít k zaseknutí kuličky ve valivém bloku a vzniku mechanického poškození kolejnice. K přenosu většího klopného momentu nebo navýšení tuhosti vedení se používají kolejnice s dvojnásobnou šířkou. [4] [8]

### 3.3 Detekce polohy

Detekce polohy je důležitou součástí každého manipulátoru. U některých se používají čidla, která dodávají okamžité informace o poloze, nebo koncové snímače, které slouží jako reference polohy. Detekce polohy se rozděluje podle typu snímače na mechanickou, optickou a indukční.

#### 3.3.1 Optická detekce polohy

U optických snímačů se používají LED diody jako zdroj světla a pro snímání a vyhodnocení jsou použity CCD snímače, fotodiody nebo fotorezistory. Využívají se tři konstrukční principy: vyhodnocování změny polohy zdroje, přerušování světelného toku mezi zdrojem a detektorem nebo interference zdrojového a odraženého paprsku. Optické snímače mohou být použity pro spojité měření polohy (absolutní nebo inkrementální) nebo pro nespojitou indikaci polohy. [9] [10]

##### Spojité optické snímače

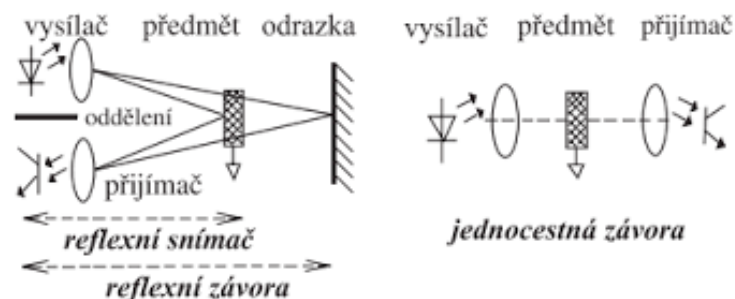
Signál z absolutních snímačů obsahuje úplnou informaci o poloze, protože je přesně definována vůči referenčnímu bodu. K tomuto se používá kódový obrazec. Pro přímočarý pohyb se používá pravítka a pro rotační se používá kotouč. Na pravítku nebo kotouči se nachází systém průhledných a neprůhledných ploch předem definovaný. [9] [10]

Interferometrické snímače pracují na principu skládání dvou vln. Jedna z vln je referenční a druhá měrná. Svazek ze zdroje (laseru) prochází přes polopropustnou plochu pod úhlem 45°. Od ní se část odrazí k pevnému zrcadlu a část postupuje k pohyblivému zrcadlu připevněnému na měřeném objektu. Od zrcadel se paprsky odrazí a na polopropustné ploše dojde k jejich složení a vytvoření interferenčních kroužků.

Při posunutí o vlnovou délku  $\lambda$  se objeví dva impulzy. Sečtené paprsky se vyhodnocují pomocí fotodetektoru. [9] [10]

##### Nespojité optické snímače

Na rozdíl od spojitých snímačů poskytují údaj o poloze jakožto binární signál. Základní rozdělení je podle jejich rozložení vysílače a přijímače do dvou skupin – reflexní a průchozí (jednocestné) snímače. [9] [10]



Obrázek 11: Schéma rozložení vysílače a přijímače optického snímače

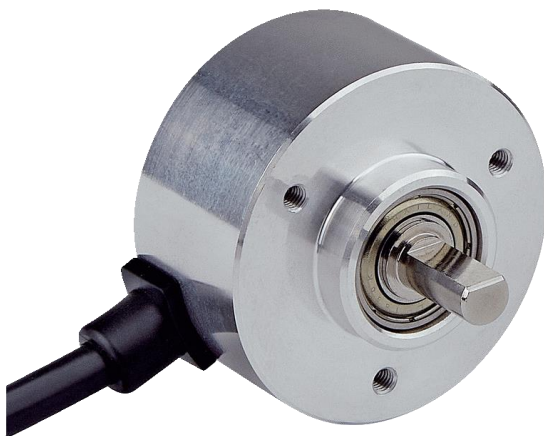
Obě varianty je možné realizovat jako známé optické závory, záclony nebo světelnou (optickou) mřížku. Jednoduchá závora je jednorozměrná, tvořena jedním

přijímačem a jedním vysílačem. Při kombinaci několika závor a logickým propojením jejich výstupu dostaneme optickou mříž, která hlídá přerušení optického paprsku po celé ploše. Optickou mříž je možné realizovat i pomocí jednoho přijímače a vysílače, kdy je paprsek z vysílače odražen pomocí zrcadel nebo jiné odrazové plochy do přijímače. Takové sestavení snímače je označováno jako světelná záclona. [9] [10]

### 3.3.2 Mechanická detekce polohy

Při mechanické detekci polohy se jedná o koncové spínače, které při sepnutí vyšlou signál do řídicí jednotky. Výpočet polohy pak provádí software při využití vstupních neměnných parametrů jako stoupání kuličkového šroubu, počet kroků motoru nebo vstupního signálu z otáčkoměru implementovaného v motoru. Výhodou je možnost jednoduché změny maximálního možného rozsahu, pokud to dovolují mechanické vlastnosti sestavy. Jedná se o levnější řešení než využití propracovanějších snímačů a jejich výměna bývá rychlejší a méně náročná na čas údržby. Nevýhodou je nutnost poměrně přesného umístění pro referenci, aby správně snímali a možnost mechanického poškození při chodu stroje.

Inkrementální enkodéry dodávají informaci o poloze, úhlu a počtu otáček. Jejich rozlišení je definováno při výrobě počtem pruhů nebo impulzů na jednu otáčku, které enkodér posílá do řídicí jednotky. U větších motorů bývají často už jeho součástí. Při použití inkrementálního enkodéru je opět nutno provést referenční jízdu. [11]



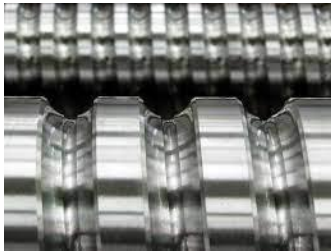
Obrázek 12: Inkrementální enkodér DLS40

Lineární enkodéry dávají informaci o poloze s absolutním snímáním pozice a rychlosti. Díky této vlastnosti není nutná na začátku zapnutí přístroje referenční jízda a řídicí elektronika dostává okamžité informace o poloze. Skládají se z magnetické pásky a čtecí hlavy. Mezi páskou a čtecí hlavou je vzduchová mezera, převážně bývá v rozsahu 0,1 – 2,0 mm. Senzor má proto větší dobu životnosti a nevyžaduje žádnou údržbu. Měřící rozsah může dosahovat až několik desítek metrů. Měřidla mají vysoké rozlišení až do 1  $\mu\text{m}$  s vysokou rychlostí posuvu až 10 m/s. Čidla jsou odolná vůči okolním podmínkám jako orosení nebo znečištění magnetického pásky či hlavy. [12]

### 3.4 Kuličkový šroub s maticí

Používají se ke změně rotačního pohybu hřídele motoru na pohyb translační. Po šroubu obíhají v závitě kuličky uzavřené v matici. Obíháním kuliček se využívá valivého odporu, který je menší než dynamické tření, u kterého je třeba před změnou pohybu překonat statické tření, které je větší. Snížením tření výsledná účinnost nabývá hodnot od 90 % a více. Šroub i matice je vyrobena z oceli. Povrch závitů je kalený a pro dosažení větší přesnosti je závit broušen. [4]

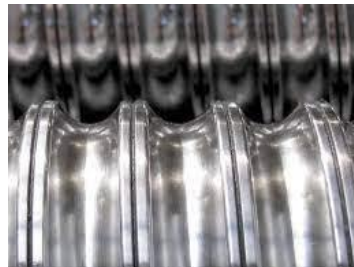
Kuličkové šrouby mají dva základní tvary profilů závitů – gotický profil a kruhový profil. Kruhový profil je jednodušší a rychlejší na výrobu. Nejčastěji se vyrábí válcováním. Nevýhodou kruhového profilu je menší přesnost závitů a vyšší zatížení kuliček – 2 kontaktní body. Gotický profil má lepší vlastnosti, protože se skládá ze dvou oblouků. Každý z oblouků má dva stykové body na kuličku a tím dochází k lepšímu přenosu a rozložení zatížení. Výroba takového závitů je složitější, prvním krokem je okružování hřídele a následně broušení vzniklého závitů. [4]



a)



b)



c)

Obrázek 13: Profily kuličkového šroubu – a) broušený profil, b) okružovaný profil, c) válcovaný

Kuličkový šroub má dvě možnosti uchycení. Nejčastější variantou je pevné uchycení matice na součást, která se má lineárně posouvat a šroub je poháněn motorem. Druhou možností je pevné uchycení kuličkového šroubu a poháněná matice, která se otáčí a zároveň posouvá. [4]

Kuličky v matici obíhají v interním nebo externím převodu. U interního převodu dochází k rotaci kuliček v rámci jednoho závitů. U externího převodu dochází k převodu kuliček přes několik závitů. Matice na rychloběžných kuličkových šroubech mají podélný axiální otvor a speciálně vyrobená čelní víčka pro zajištění plynulého převodu kuliček i při vysokých otáčkách. Jednotlivé typy převodu kuliček určují maximální možné otáčky šroubu a je třeba vybírat vhodný typ. [4]



*Obrázek 14: Matice kuličkového šroubu*

Jako u všech obráběných součástí se vyskytuje vůle mezi kuličkovým šroubem a maticí. K vymezení této vůle se používá několik způsobů: většími kuličkami v matici, použití dělené matice s vhodně zvolenou nabroušenou distanční podložkou nebo použití talířové pružiny k předepnutí matice. Při předepnutí matice je nutné brát vznik tepla při větších rychlostech, čímž dochází ke snížení životnosti kuličkového šroubu. Výběrem předepnuté matice dojde ke zvýšení tuhosti kuličkového šroubu a snížení osové vůle mezi maticí a šroubem. Předepnuté matice jsou výhodné v sestavách, kde je požadována přesnost při polohování i jeho opakovatelnost. [4]

## 4 Návrh dvouosého manipulátoru s vakuovým upínáním vzorků

Konstrukční návrh dvouosého manipulátoru musí splňovat požadavky na minimální posuv v jednotlivých osách při známé maximální hmotnosti vzorku. Pro normované rozměry vzorků musí být možnost vyměnitelného vakuového držáku vzorků. Požadovaný posuv v ose X a ose Y je 110 mm od středové roviny. Celkový posuv manipulátoru v jednotlivých osách je 220 mm. Návrh obsahuje i jednoduché připojení a odpojení vývěvy pro uchycení vzorků.

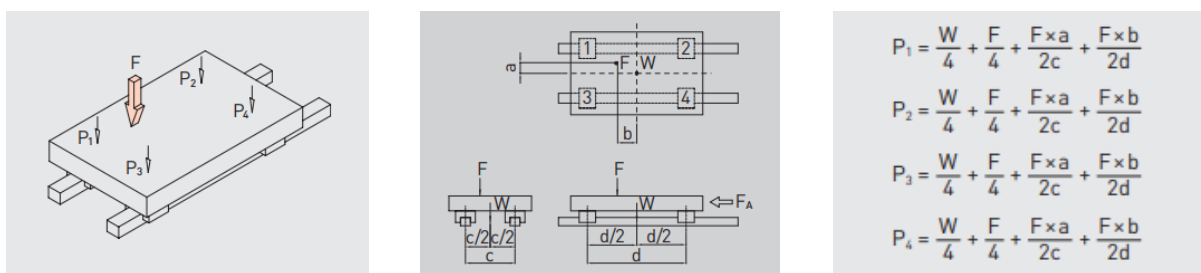
### 4.1 Návrh osy X

Při návrhu osy bylo dbáno na požadované parametry pro rozsah posuvu, jeho rychlost a přesnost. Z důvodů designu bylo navrženo řešení, které vychází z monobloku, v němž jsou uloženy důležité komponenty a vedeny hadičky pro uchycení vzorků. Na základní desce se nachází rozbočovač pro hadici od vývěvy na 4 menší hadičky z důvodu větší flexibility a ušetření místa pro ohyb. S ohledem na co nejmenší zástavbové rozměry, velký posuv osy a ekonomickému hledisku byly motory umístěny mimo monoblok.

#### 4.1.1 Výběr lineárních vedení

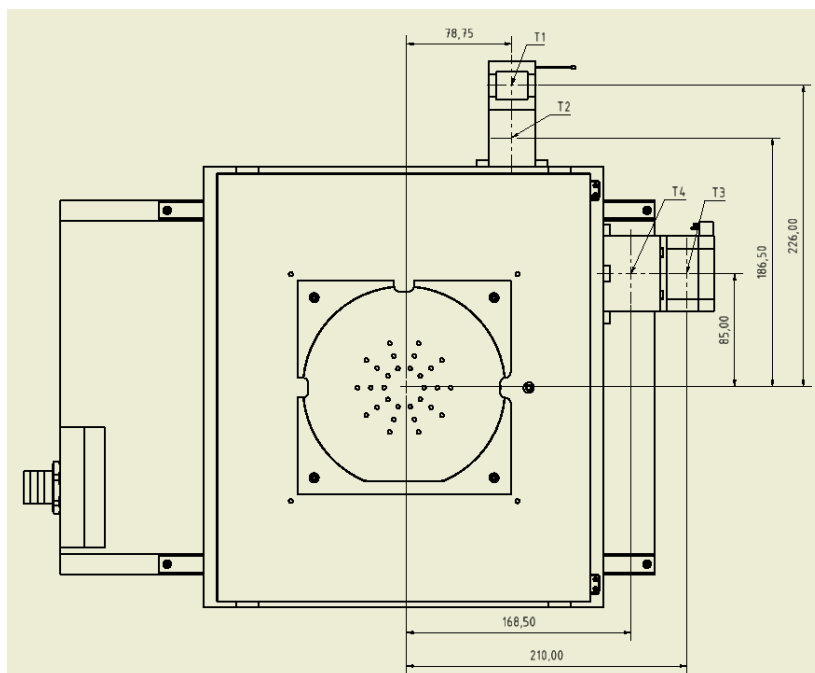
Jako dodavatel lineárního vedení byla vybrána společnost HIWIN s ohledem na předchozí pozitivní zkušenosti. Jelikož se jedná o hlavní osu, která bude zatěžována největší hmotností a taky momentem, bylo zvoleno řešení s rozložením zatížení na čtyři vozíky. Na každé kolejnici se nacházejí dva vozíčky s rozestupem. Kolejnice jsou přišroubovány k základně a vozíčky k monobloku.

Pro výpočet zatížení vozíku byla zvolena poloha, když bude vzorek ve středu na ose Y ve stejném středu s osou X a druhá. Jelikož při vyosení horná osy Y nedojde k přesahu těžiště vzorku mimo rozpětí vozíčků, vzniklé zatížení nebude větší než normálové zatížení.



Obrázek 15: Axiální zatížení osy X [13]

Dle obrázku 15 sestavíme rovnice pro jednotlivé zatížení vozíku. Pro první případ uvažujeme základní polohu osy Y, a to přesně ve středu manipulátoru. Síla F nám tedy bude představovat pouze zatížení hmotností od motorů a jejich obrobků na uchycení k monobloku.



Obrázek 16:Vzdálenosti těžišť úchytů motorů

Na obrázku 16 je znázorněné vyosení těžišť jednotlivých dílů, které jsou mimo osu a jejíž zatížení počítáme únosnost vozíků. Označení vzdáleností od středu je stejné jako v obrázku 11 sepsáno v tabulce 2. Sílu  $F_G$  spočítáme pro tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  ze vztahu:

$$F_{G1} = m \cdot g = 0,162 \cdot 9,81 = 1,59 \text{ N} \quad (5)$$

Těžiště	hmotnost [kg]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	$F_G$ [N]
T1	0,162	226,00	78,75	265,00	64,00	1,59
T2	0,07	186,50	78,75			0,70
T3	0,511	85,00	210,00			5,01
T4	0,21	85,00	168,50			2,02

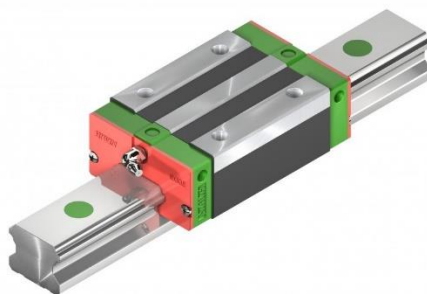
Tabulka 2: Vzdálenost těžišť a tíhová síla

Pro těžiště T2 je vzdálenost  $a = 186,5 \text{ mm}$  a vzdálenost  $b = 78,75 \text{ mm}$ , hmotnost motoru  $m_l = 0,320 \text{ kg}$ .

Podle ukázkových rovnic v obrázku 11 sestavíme rovnice pro jednotlivé vozíky. Celková hmotnost po umístění největšího vzorku působící na vozíky je  $W = 13,6 \text{ kg}$ .

$$P_1 = \frac{W}{4} + \frac{F_{G1}}{4} + \frac{F_{G1} \cdot a}{2c} + \frac{F_{G1} \cdot b}{2d} + \frac{F_{G2} \cdot a}{2c} + \frac{F_{G2} \cdot b}{2d} + \frac{F_{G3} \cdot a}{2c} + \frac{F_{G3} \cdot b}{2d} + \frac{F_{G4} \cdot a}{2c} + \frac{F_{G4} \cdot b}{2d} = 48,09 \text{ N} \quad (6)$$

Jelikož jsou rovnice pro vozíky P1 až P4 stejné díky rovnoměrnému zatížení, stačí spočítat hodnotu na jednom vozíku. Pro vybraný typ vozíku s označením EGH 15 CA od značky HIWIN je statické zatížení maximálně 9400 N, jelikož se vozíky pohybují, je třeba počítat, zda zatížení nepřekročí maximální dynamické zatížení, které je 5350 N. Kritérium návrh splňuje s velkou bezpečností.



Obrázek 17: Lineární vedení osy X značky HIWIN

#### 4.1.2 Výběr kuličkového šroubu

Pro zajištění pohybu osy X byl zvolen kuličkový šroub se stoupáním 2 mm/ot od společnosti NSK Europe. Na šroubu se nachází předepnutá matice, která vymezuje vůli mezi maticí a šroubem. Tím zajišťuje opakovatelné polohování celé osy.

Název veličiny	Označení veličiny	Hodnota	Jednotka
Průměr kuličkového šroubu	d	11,7	[mm]
Malý průměr kuličkového šroubu	d <sub>k</sub>	9,9	[mm]
Stoupání šroubu	P	2	[mm]
Dynamická únosnost	C <sub>dyn</sub>	1660	[N]
Statická únosnost	C <sub>O</sub>	3620	[N]
Název veličiny	Označení veličiny	Hodnota	Jednotka
Maximální otáčkový faktor	D <sub>nmax</sub>	3000	[-]
Koeficient uložení	k <sub>d</sub>	1,88	[-]
Koeficient závislosti na uložení	k <sub>k</sub>	2,05	[-]
Vzdálenost mezi ložisky	l <sub>d</sub>	321	[mm]
Nepodepřená délka hřídele	l <sub>k</sub>	293	[mm]
Gravitační zrychlení	g	9,81	[m/s <sup>2</sup> ]
Rychloposuv	v <sub>r</sub>	0,3	[m/min]
Doba rozběhu	t <sub>p</sub>	0,2	[s]
Úhel sklonu vedení	α <sub>x</sub>	0	[°]
Celková maximální hmotnost	m <sub>kx</sub>	13,6	[kg]

Tabulka 3: Parametry kuličkového šroubu

### Výpočet maximálních otáček šroubu:

Pro výpočet maximálních otáček použijeme rovnici (7), kde  $n_r$  jsou maximální otáčky pro zvolené parametry z tabulky 3.

$$n_r = \frac{v_r}{P} \cdot 10^{-3} = \frac{30}{2} \cdot 10^{-3} = 150 \text{ ot/min} \quad (7)$$

### Kontrola maximálních otáček:

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_k \cdot 10^8}{l_d^2} = \frac{1,88 \cdot 9,9 \cdot 10^8}{321^2} = 18\,062,71 \text{ ot/min} \quad (8)$$

Kde  $n_k$  jsou kritické otáčky kuličkového šroubu.

### Maximální konstrukční otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 18062,71 = 14\,450,17 \text{ ot/min} \quad (9)$$

Kde  $n_{max}$  jsou maximální konstrukční otáčky.

Pro posouzení kuličkového šroubu z pohledu navrhovaných otáček musí platit vztah  $n_r < n_{max}$ ,  $150 < 14450,17$ . Podmínka je splněna, takže vybraný kuličkový šroub vyhovuje.

Dalším faktorem pro posouzení je kontrola vzpěrné tuhosti, při které se posuzuje maximální zatížení kuličkového šroubu  $F_{kmax}$  s axiální silou působící na šroub  $F_{ks}$  a silou působící při rozběhu motoru na požadovanou hodnotu rychloposuvu  $F_{kd}$ .

Axiální statickou sílu působící na kuličkový šroub  $F_{ks}$  určíme ze vztahu:

$$F_{ks} = m_{kx} \cdot g = 13,6 \cdot 9,81 = 133,42 \text{ N} \quad (10)$$

Axiální sílu působící při rozběhu motoru na požadovanou hodnotu rychloposuvu  $F_{kd}$  určíme ze vztahu:

$$F_{kd} = m_{kx} \cdot \left( g + \frac{v_r}{t_p} \right) = 13,6 \cdot \left( 9,81 + \frac{0,3}{0,2} \right) = 153,82 \text{ N} \quad (11)$$

Dále musíme určit maximální teoretickou dovolenou sílu  $F_k$  ze vztahu:

$$F_k = \frac{k_k \cdot d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = \frac{2,05 \cdot 9,9^4}{293^2} \cdot 10^5 = 22\,938,20 \text{ N} \quad (12)$$

Maximální dovolená axiální síla působící na šroub  $F_{kmax}$  je rovná polovině  $F_k$ :

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 22\,938,2 = 11\,469,1 \text{ N} \quad (13)$$

Aby šroub vyhovoval z hlediska axiálního zatížení, tak musí být splněna podmínka, že  $F_{ks}$  a  $F_{kd} < F_{kmax}$ . Podle výpočtů je podmínka splněna a šroub splňuje požadavky na axiální zatížení.

Posledním parametrem posuzovaným při výběru kuličkového šroubu je kontrola otáčkového faktoru  $d_n$  podle vztahu:

$$d_n = d \cdot n_r = 11,7 \cdot 150 = 1\,755 \text{ [-]} \quad (14)$$

Musí platit podmínka  $d_n < D_{nmax} = 1\,755 < 3\,000$ . Podmínka platí a kritérium je splněno.

Všechny podmínky pro návrh kuličkového šroubu jsou splněny a vybraný kuličkový šroub lze použít v návrhu dvouosého manipulátoru. Vybraný kuličkový s požadovanými parametry je od firmy NKS Europe s typovým označením W1002MA-4Y-C3T2-NSK. Šroub je vyroben s třídou přesnosti C3, která určuje přesnost stoupání s odchylkou  $8 \mu\text{m}$  na délce  $300 \text{ mm}$ . Ilustrační obrázek kuličkového šroubu osy X je na obrázku 18.



Obrázek 18: Kuličkový šroub osy X

#### 4.1.3 Výběr motoru osy X

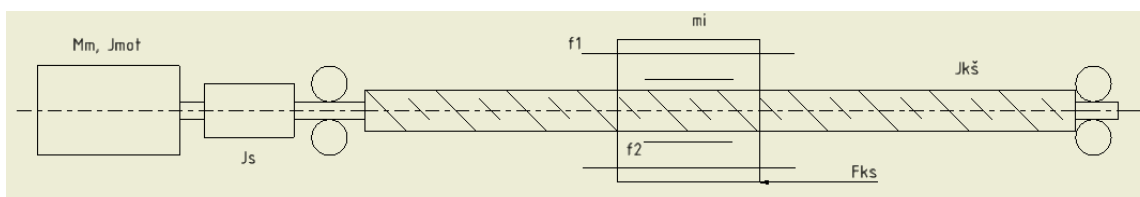
Při výběru motoru pro osu X bude posuzováno statické, kinematické a dynamické hledisko motoru. Uspořádání komponentů, pro které se počítalo kinematické, statické a dynamické hledisko, je na obrázku 19. Tabulka 4 obsahuje veličiny účinností, sestavy, které jsou potřebné při výpočtech.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Účinnost valivého vedení	$\eta_1$	0,98	[-]
Účinnost uložení kuličkového šroubu	$\eta_2$	0,94	[-]
Účinnost kuličkového šroubu s maticí	$\eta_3$	0,92	[-]
Součinitel tření ve vodících plochách	$f_1$	0,005	[-]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	$f_2$	0,003	[-]

Tabulka 4: Tabulka účinností lineárního vedení osy X

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Maximální otáčky	$n_{\max}$	300	[ot/min]
Výkon	$P_m$	13	[W]
Statický moment	$M_m$	0,6	[Nm]
Moment setrvačnosti motoru	$J_{\text{mot}}$	0,000012	[kgm <sup>2</sup> ]
Hmotnost motoru	$m_m$	0,511	[kg]

Tabulka 5: Tabulka parametrů motoru Nema 23



Obrázek 19: Schéma uspořádání osy X

### Statické hledisko

První krok zahrnuje určení celkové účinnosti sestavy  $\eta_c$  vynásobením všech účinností sestavy:

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,92 = 0,85 [-] \quad (15)$$

Následně určíme statické hledisko  $M_{mstat}$ . Jelikož nepůsobí žádná vnější síla proti směru pohybu  $F_{x0} = 0 \text{ N}$  a síla od kuličkového šroubu je s ním rovnoběžná, proto se úhel  $\alpha = 0^\circ$ .

$$M_{mstat} = \frac{F_{x0} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} + \frac{F_{ks} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot \sin(\alpha_x) \quad (16)$$

$$M_{mstat} = \frac{0 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} = \frac{133,42 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot \sin(0^\circ) = 0 \text{ Nm} \quad (17)$$

Na základě výpočtu byl zvolen krokový motor s označením Nema 23 s parametry v tabulce 4. Krokový motor Nema 23 má běžný krokový úhel  $1,8^\circ$  tudíž 200 kroků na celou otáčku ( $360^\circ$ ). Pro přesnější natočení lze ještě jednotlivé kroky rozdělit pomocí softwaru na mikrostepy.

### Kinematické hledisko

V kinematickém hledisku je nejdůležitějším faktorem lineární zrychlení  $a$ , které je ovlivněno rychlostí rychloposuvu  $v_r$  a hodnotou rozběhu  $t_p$ . Lineární zrychlení se vypočítá následujícím vztahem:

$$a = \frac{v_r \cdot 60^{-1}}{t_p} = \frac{0,30 \cdot 60^{-1}}{0,20} = 0,025 \text{ m/s}^2 \quad (18)$$

Úhlové zrychlení motoru určíme pomocí hodnoty lineárního zrychlení z předchozí rovnice a dosadíme ho do vzorce:

$$\epsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,025}{2 \cdot 10^{-3}} = 78,54 \text{ rad/s}^2 \quad (19)$$

### Dynamické hledisko

Zvolený motor musí ještě splňovat dynamické hledisko. Pro posouzení potřebujeme momenty setrvačnosti od jednotlivých komponent, které jsou spojeny s motorem. Hodnoty jsou vypsány v tabulce 6.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Moment setrvačnosti motoru	$J_{\text{mot}}$	0,00001200	[kgm <sup>2</sup> ]
Moment setrvačnostikuličkového šroubu	$J_{\text{ks}}$	0,00000548	[kgm <sup>2</sup> ]
Moment setrvačnosti spojky	$J_s$	0,00000422	[kgm <sup>2</sup> ]

Tabulka 6: Momenty setrvačnosti komponent osy X

Moment setrvačnosti motoru a kuličkového šroubu je udáván výrobcem. Moment setrvačnosti pro spojku hřídeli vypočítáme podle vztahu:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot (R^2 + r^2) \quad (20)$$

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Hmotnost	$m_s$	0,031	[kg]
Vnější poloměr	R	12,5	[mm]
Vnitřní poloměr	r	4	[mm]

Tabulka 7: Rozměry a hmotnost spojky osy X

Po dosazení hodnot z tabulky 7 do rovnice 20 dostaneme potřebný moment setrvačnosti pro spojku kuličkového šroubu a hřídele motoru. Poloměry musíme dosadit v metrech:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot 0,031 \cdot (0,0125^2 + 0,004^2) = 0,00000267 \text{ kgm}^2 \quad (21)$$



Obrázek 20: Spojka motoru a kuličkového šroubu

Nejdřív musíme určit moment setrvačnosti přesouvaných hmot na ose X ( $J_m$ ), které musí motor rozpohtovat.

$$J_m = m_{kx} \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 13,6 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 0,00000138 \text{ kgm}^2 \quad (22)$$

Dále určíme moment od přenesených hmot  $M_g$ .

$$M_g = \frac{m_{kx} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \quad (23)$$

$$M_g = \frac{13,6 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(90^\circ) \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} = 0 \text{ Nm} \quad (24)$$

Sílu předeprnutí kuličkového šroubu spočítáme podle vztahu:

$$F_p = 0,35 \cdot F_{ks} = 0,35 \cdot 133,41 = 46,7 \text{ N} \quad (25)$$

Následně je třeba určit ztrátový moment šroubu  $M_{zks}$ :

$$M_{zks} = \frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_1^2) \quad (26)$$

$$M_{zks} = \frac{46,7 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot (1 - 0,98^2) = 0,000694 \text{ Nm} \quad (27)$$

Celkový moment redukováný na hřídel motoru  $M_{crm}$ :

$$M_{crm} = M_g + M_{zks} = 0 + 0,000694 = 0,000694 \text{ Nm} \quad (28)$$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru  $J_{rhm}$ :

$$J_{rhm} = J_m + J_{mot} + J_{ks} + J_s \quad (29)$$

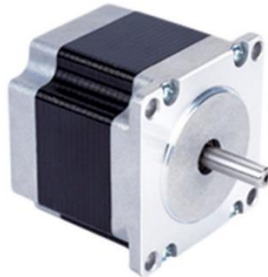
$$\begin{aligned} J_{rhm} &= 0,00000138 + 0,000012 + 0,00000548 + 0,00000422 \\ &= 0,00002307 \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (30)$$

Z rovnice 28 určíme potřebný moment motoru pro rozběh osy X:

$$M_{mz} = (J_{rhm} \cdot \epsilon_m) + M_{crm} \quad (31)$$

$$M_{mz} = (0,00002307 \cdot 78,54) + 0,000694 = 0,002507 \text{ Nm} \quad (32)$$

Potřebný moment pro rozběh osy X vyšel  $M_z = 0,002507 \text{ Nm}$ . Motor Nema 23 má podle výrobce moment  $0,6 \text{ Nm}$ , takže zvolený motor zvládne osou X pohybovat při zvoleném rychloposuvu.



Obrázek 21: Motor osy X

#### 4.1.4 Popis konstrukce osy X

Konstrukce osy X se inspirovala manipulátorem od firmy Cactux. Lineární vedení pro posuv byly zvoleny od společnosti HIWIN s ohledem na předchozí kladné zkušenosti. Celkové zatížení je rozloženo do čtyř vozíků na dvou kolejnicích. Kolejnice jsou pevně uchyceny k základně manipulátoru. Kroutící moment od motoru je přenášen na kuličkový šroub pomocí spojky z hliníkové slitiny. Spojka je schopná přenášet maximální kroutící moment až  $3 \text{ Nm}$ . Vzhledem k maximálnímu momentu motoru  $0,6 \text{ Nm}$  je spojka vhodným řešením. Pro zajištění pohybu a přesného posuvu osy X je zvolen kuličkový šroub s předepnutou maticí se stoupáním  $2 \text{ mm/ot}$  s přesností C3.

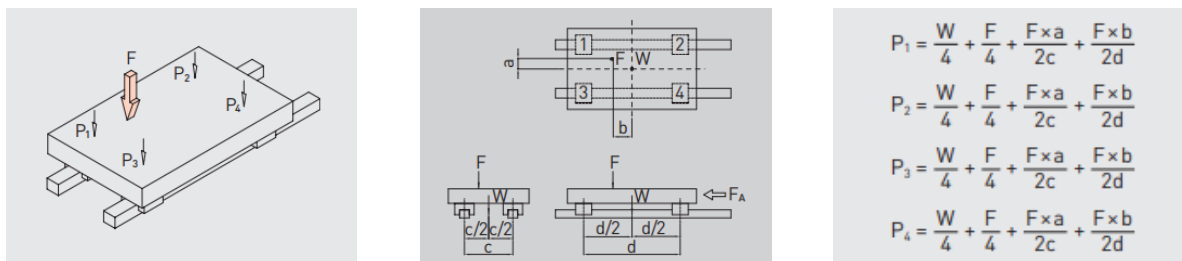
Předepnutá matice vymezuje vůli mezi závitem šroubu a maticí, čímž je zajištěno opakované přesné polohování při chodu. Pro odměřování polohy byly zvoleny mechanické spínače, které omezují rozsah pojezdu. Při prvním zapnutí je nutná referenční jízda a následná poloha se přepočítává v programu. Na základně osy X je přichycen rozbočovač pro vývěvu, který zmenšuje průměr hadice ze vstupní 25 mm hadice od vývěvy na čtyři 12 mm polyurethanové hadičky. Tímto způsobem je dosaženo menšího poloměru ohybu hadiček v manipulátoru a snížena celková výška monobloku.

## 4.2 Návrh osy Y

Při návrhu osy Y bylo dbáno na požadovaný celkový posuv 220 mm od střední roviny. Na osu Y jsou následně upevněny držáky vzorků s podtlakovým upevněním. Ze spodní strany základny osy je umístěna čtečka pro identifikaci jednotlivých typů držáků vzorků. Na spodní straně se nachází také vstup pro hadičky na napojení vývěvy. Aby bylo zajištěno dokonalé utěsnění mezi jednotlivými díly, bylo přidáno na spodní i vrchní část vybrání pro o-kroužek.

### 4.2.1 Výběr lineárního vedení

Pro osu Y bylo opět zvoleno lineární vedení od společnosti HIWIN, které se skládá z vozíku a kolejničky. Zatížení osy Y je menší, protože se zde nenachází velké součásti s velkou hmotností. Vozíky byly voleny stejné jako pro osu X z důvodu větší výšky kolejničky a samotného vozíku. Tím je možné v monobloku udělat větší vybrání a tím snížit celkovou hmotnost, která zatěžuje osu X. Jelikož je zatížení menší, byla zvolena varianta pouze jednoho vozíku na každé kolejničce.



Obrázek 22: Zatížení vozíků osy Y [13]

Na obrázku 22 je zobrazeno rozmístění zatížení a vzorové rovnice pro výpočet zatížení jednotlivých vozíků. Osa Y se skládá pouze ze dvou vozíků, tudíž rovnice je třeba upravit do tvaru:

$$P_1 = \frac{W}{2} + \frac{F}{2} + \frac{F \cdot a}{2 \cdot c} + \frac{F \cdot b}{2 \cdot d} \quad (33)$$

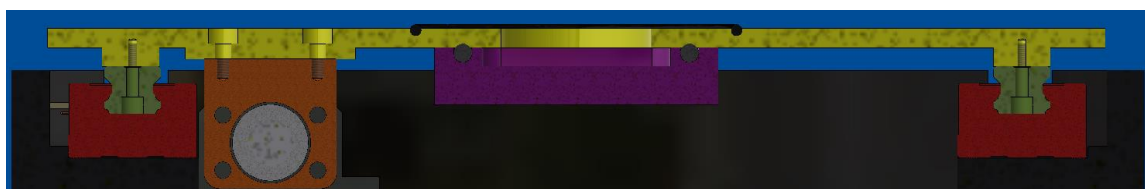
$$P_2 = \frac{W}{2} + \frac{F}{2} + \frac{F \cdot a}{2 \cdot c} + \frac{F \cdot b}{2 \cdot d} \quad (34)$$

V rovnicích se počítá i s vnějším kolmým zatížením. Jelikož takové vnější zatížení se v tomto případě nevyskytuje, síla  $F = 0 \text{ N}$  a hodnota  $W = F_G$ . Vozíky se nachází ve středové rovině, tudíž při celkovém posuvu  $220 \text{ mm}$  je délka posuvu na každou stranu rozdělena přesně na polovinu ( $110 \text{ mm}$ ).



Obrázek 23: Řez modelem osou Y

Na obrázku 23 je červenou barvou vyznačen vozík pevně uchycen do monobloku a zelenou barvou kolejničce od společnosti HIWIN. Žlutá barva označuje pohyblivou základnu osy Y, na kterou se následně upevňují držáky vzorků.



Obrázek 24: Čelní řez osou Y

Na obrázku 24 jde vidět rozmístění vozíků (červené označení), obrobek pro úchyt hadiček odtahu (fialové označení), černou barvou označené o-kroužky a oranžovou barvou označen obrobek pro uchycení matice kuličkového šroubu na základnu osy Y. Jelikož je zatížení uprostřed, vzdálenosti  $a$  a  $b$  jsou nulové. Celková hmotnost sestavy je  $5,43 \text{ kg}$ . Označení vzdáleností je stejné jako v obrázku 18 a hodnoty v tabulce 8.

hmotnost [kg]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	$F_G$ [N]
5,43	0,00	0,00	235,50	110,00	53,27

Tabulka 8: Hodnoty veličin osy Y

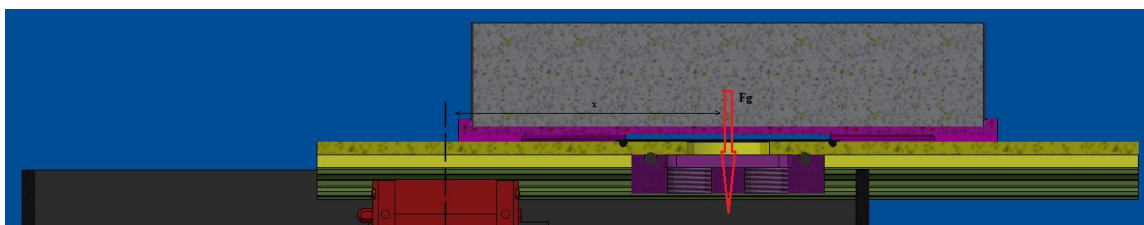
Tíhovou sílu vypočítáme z celkové hmotnosti a vzorce:

$$F_G = m \cdot g = 5,43 \cdot 9,81 = 53,27 \text{ N} \quad (35)$$

Po dosazení hodnot do upravených vzorců dostáváme rovnici:

$$P_1 = \frac{53,27}{2} = 26,64 \text{ N} \quad (36)$$

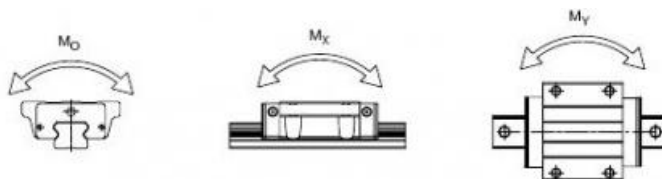
Zatížení jednoho vozíku je tedy 26,64 N. Podle výrobce je statické zatížení vozíku 9 400 N a dynamické maximálně 5 350 N. Vozík není zatěžován přes povolenou hodnotu.



Obrázek 25: Maximální vyosení zátěže

Jelikož je zde jen jeden vozík a zatížení může dosahovat kritických hodnot při vyosení zátěže v koncové poloze a největším vzorku, je třeba spočítat i vzniklý moment  $M_x$  zda nepřesahuje maximální povolenou hodnotu. Vyosení je ve vzdálenosti  $x = 110 \text{ mm}$ . Moment  $M_x$  spočítáme podle vzorce:

$$M_x = F_g \cdot x = 5,43 \cdot 0,11 = 0,6 \text{ Nm} \quad (37)$$



Obrázek 26: Označení působících momentů na vozík [13]

Maximální hodnota momentu v ose x pro jeden vozík s označením EGH 15 CA od společnosti HIWIN je 100 Nm. V rovnici 36 vyšel moment  $M_x = 0,6 \text{ Nm}$ , který je mnohem menší než maximální povolený moment.

#### 4.2.2 Výběr kuličkového šroubu

Kuličkový šroub pro osu Y byl vybrán od stejné firmy jako na osu X a to od dodavatele NSK Europe. Stoupání je opět 2 mm/ot a průměr kuličkového šroubu je 12 mm. Tabulka 9 obsahuje charakteristické hodnoty šroubu potřebné pro výpočet a kontrolu únosnosti s ohledem na požadavky.

Název veličiny	Označení veličiny	Hodnota	Jednotka
Průměr kuličkového šroubu	d	11,7	[mm]
Malý průměr kuličkového šroubu	d <sub>k</sub>	9,9	[mm]
Stoupání šroubu	P	2	[mm]
Dynamická únosnost	C <sub>dyn</sub>	1660	[N]
Statická únosnost	C <sub>O</sub>	3620	[N]
Maximální otáčkový faktor	D <sub>nmax</sub>	3000	[-]
Koeficient uložení	k <sub>d</sub>	1,88	[-]
Koeficient závislosti na uložení	k <sub>k</sub>	2,05	[-]
Vzdálenost mezi ložisky	l <sub>d</sub>	342	[mm]
Nepodepřená délka hřídele	l <sub>k</sub>	314	[mm]
Gravitační zrychlení	g	9,81	[m/s <sup>2</sup> ]
Rychloposuv	v <sub>r</sub>	0,15	[m/min]
Doba rozběhu	t <sub>r</sub>	0,2	[s]
Úhel sklonu vedení	α <sub>x</sub>	0	[°]
Celková maximální hmotnost	m <sub>kx</sub>	5,43	[kg]

Tabulka 9: Přehled parametrů kuličkového šroubu osy Y

#### Výpočet maximálních otáček šroubu:

$$n_r = \frac{v_r}{P} \cdot 10^{-3} = \frac{15}{2} \cdot 10^{-3} = 75 \text{ ot/min} \quad (38)$$

Kde  $n_r$  jsou maximální otáčky šroubu pro stoupání 2 mm/ot a rychloposuv  $v_r = 15 \text{ mm/s}$ .

#### Kontrola maximálních otáček:

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_k \cdot 10^8}{l_d^2} = \frac{1,88 \cdot 9,9 \cdot 10^8}{342^2} = 15 \, 912,59 \text{ ot/min} \quad (39)$$

Kde  $n_k$  jsou kritické otáčky šroubu.

#### Maximální konstrukční otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 15 \, 912,59 = 12 \, 730,07 \text{ ot/min} \quad (40)$$

Kde  $n_{max}$  jsou maximální konstrukční otáčky, ve kterých dokáže šroub fungovat.

Zda kuličkový šroub vyhovuje z hlediska maximálních otáček, musí být splněna podmínka  $n_r < n_{max}$ ,  $75 < 12 \, 730,07$ . Podmínka je splněna a šroub z pohledu otáček vyhovuje.

Dalším faktorem k posouzení je vzpěrná tuhost šroubu vzhledem na zatížení. Posuzujeme maximální zatížení kuličkového šroubu  $F_{kmax}$  s axiální silou  $F_{ks}$  a silou působící při rozběhu motoru na požadovaný rychloposuv  $F_{kd}$ .

Axiální statickou sílu působící na kuličkový šroub určíme ze vztahu:

$$F_{ks} = m_{kx} \cdot g = 5,43 \cdot 9,81 = 53,24 \text{ N} \quad (41)$$

Axiální síla působící na šroub při rozběhu na požadovaný rychloposuv vypočítáme ze vztahu:

$$F_{kd} = m_{kx} \cdot \left( g + \frac{v_r}{t_p} \right) = 5,43 \cdot \left( 9,81 + \frac{15}{0,2} \right) = 57,31 \text{ N} \quad (42)$$

Abychom mohli posoudit axiální zatížení musíme určit maximální teoretickou dovolenou sílu  $F_k$  ze vztahu:

$$F_k = \frac{k_k \cdot d_k^4}{l_k^2} \cdot 10^5 = \frac{2,05 \cdot 9,9^4}{314^2} \cdot 10^5 = 19\,972,63 \text{ N} \quad (43)$$

Maximální dovolená pracovní axiální síla  $F_{kmax}$  je rovná polovičce síly  $F_k$ :

$$F_{kmax} = 0,5 \cdot F_k = 0,5 \cdot 19\,972,63 = 9\,986,32 \text{ N} \quad (44)$$

Z výsledků je patrné že  $F_{ks}$  a  $F_{kd} < F_{kmax}$ , takže kuličkový šroub splňuje i podmínku maximální pracovní axiální síly.

Posledním posuzovaným faktorem je otáčkový faktor  $d_n$ , který se určí ze vztahu:

$$d_n = d \cdot n_r = 11,7 \cdot 75 = 877,5 [-] \quad (45)$$

Musí platit  $d_n < D_{nmax} = 877,5 < 3\,000$ . Díky splnění i této podmínky kuličkový šroub vyhovuje. Vybraný kuličkový šroub od firm NSK Europe má označení W1202MA-4Y-C3T2-NSK s průměrem  $11,7 \text{ mm}$ , stoupáním  $2 \text{ mm/ot}$ . Tolerance šroubu je třídy C3, která určuje přesnost stoupání s odchylkou  $8 \mu\text{m}$  na délce  $300 \text{ mm}$ . Na šroubu se nachází předeprnutá matice.



Obrázek 27: Ilustrační obrázek kuličkového šroubu osy Y

### 4.2.3 Výběr motoru osy Y

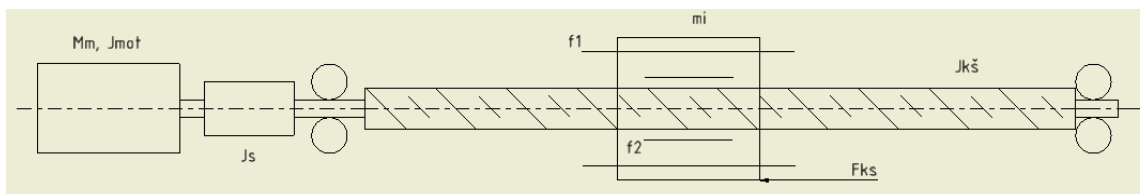
Při výběru motoru pro osu Y bude posuzováno statické, kinematické a dynamické hledisko motoru. Uspořádání komponentů, pro které se počítalo kinematické, statické a dynamické hledisko, je na obrázku 28. Tabulka 10 obsahuje veličiny účinností, sestavy, které jsou potřebné při výpočtech.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Účinnost valivého vedení	$\eta_1$	0,98	[-]
Účinnost uložení kuličkového šroubu	$\eta_2$	0,94	[-]
Účinnost kuličkového šroubu s maticí	$\eta_3$	0,92	[-]
Součinitel tření ve vodících plochách	$f_1$	0,005	[-]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	$f_2$	0,003	[-]

Tabulka 10: Tabulka účinností lineárního vedení osy Y

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Maximální otáčky	$n_{\max}$	300	[ot/min]
Výkon	$P$	5,7	[W]
Statický moment	$M_m$	0,2	[Nm]
Moment setrvačnosti motoru	$m_{kx}$	0,000027	[kgm <sup>2</sup> ]
Hmotnost motoru	$m$	0,162	[kg]

Tabulka 11: Parametry motoru osy Y



Obrázek 28: Schéma uložení komponent osy Y

### Statické hledisko

Pro vyhodnocení statického hlediska a funkčnosti je nutné nejdřív určit celkovou účinnost sestavy ze vztahu:

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,92 = 0,85 [-] \quad (46)$$

Následně určíme statický moment  $M_{ms}$ . Podobně jako u předchozí osy X působí síla  $F_{ks}$  rovnoběžně s osou kuličkového šroubu, proto se úhel  $\alpha = 0^\circ$ . Proti pohybu nepůsobí žádná vnější síla, proto  $F_{x0} = 0 \text{ N}$ .

$$M_{mstat} = \frac{F_{x0} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} + \frac{F_{ks} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot \sin(\alpha_x) \quad (47)$$

$$M_{mstat} = \frac{0 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} + \frac{53,24 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot \sin(0) = 0 \text{ Nm} \quad (48)$$

Na základě vypočítaného potřebného statického momentu byl zvolen motor Nema 13 jehož parametry jsou uvedené v tabulce 11.

### Kinematické hledisko

Abychom mohli posoudit kinematické hledisko motoru je třeba spočítat lineární zrychlení  $a$ , které je závislé na rychlosti rychloposuvu  $v_r$  a dobou rozběhu motoru  $t_p$ . Lineární zrychlení  $a$  určíme ze vztahu:

$$a = \frac{v_r \cdot 60^{-1}}{t_p} = \frac{0,15 \cdot 60^{-1}}{0,2} = 0,0125 \text{ m/s}^2 \quad (49)$$

S pomocí hodnoty lineárního zrychlení vypočítáme úhlové zrychlení motoru:

$$\epsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,0125}{2 \cdot 10^{-3}} = 39,27 \text{ rad/s}^2$$

### Dynamické hledisko

Pro posouzení dynamického hlediska je důležité znát všechny momenty setrvačnosti součástí, které jsou připojeny k motoru. Výpis hodnot momentů setrvačnosti je v tabulce 12.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Moment setrvačnosti motoru	$J_{mot}$	0,00002700	[kgm <sup>2</sup> ]
Moment setrvačnostikuličkového šroubu	$J_{ks}$	0,00000548	[kgm <sup>2</sup> ]
Moment setrvačnosti spojky	$J_s$	0,00000080	[kgm <sup>2</sup> ]

Tabulka 12: Tabulka momentů setrvačnosti osy Y

Moment setrvačnosti motoru a kuličkového šroubu je udáván výrobcem. Moment setrvačnosti pro spojku hřídelí vypočítáme podle vztahu:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot (R_1^2 + R_2^2) \quad (50)$$

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Hmotnost	$m_s$	0,015	[kg]
Vnější poloměr	$R_1$	10	[mm]
Vnitřní poloměr	$R_2$	2,5	[mm]

Tabulka 13: Hodnoty veličin spojky osy Y

Po dosazení hodnot z tabulky 13 do rovnice 51 dostaneme potřebný moment setrvačnosti pro spojku kuličkového šroubu a hřídele motoru. Poloměry musíme dosadit v metrech:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot 0,031 \cdot (0,01^2 + 0,0025^2) = 0,0000008 \text{ kgm}^2 \quad (51)$$



Obrázek 29: Ilustrační obrázek spojky osy Y

Nejdříve musíme vypočítat moment setrvačnosti přesouvaných hmot podle vzorce:

$$J_m = m_{kx} \cdot \left( \frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 5,43 \cdot \left( \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0,00000055 \text{ kgm}^2 \quad (52)$$

Dále je třeba určit moment od přenesených hmot  $M_g$ :

$$M_g = \frac{m_{kx} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \quad (53)$$

$$M_g = \frac{5,43 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} = 0,0001 \text{ Nm} \quad (54)$$

Síla předepnuté matice  $F_p$ :

$$F_p = 0,35 \cdot F_{ks} = 0,35 \cdot 53,24 = 18,63 \text{ N} \quad (55)$$

Následně musíme určit ztrátový moment kuličkového šroubu  $M_{zks}$ :

$$M_{zks} = \frac{F_p \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_c) \quad (56)$$

$$M_{zks} = \frac{18,63 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,85} \cdot (1 - 0,98^2) = 0,00028 \text{ Nm} \quad (57)$$

Celkový moment redukováný na hřídel motoru  $M_{crm}$ :

$$M_{crm} = M_g + M_{zks} = 0,0001 + 0,00028 = 0,00038 \text{ Nm} \quad (58)$$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru  $J_{rhm}$ :

$$J_{rhm} = J_m + J_{mot} + J_{ks} + J_s \quad (59)$$

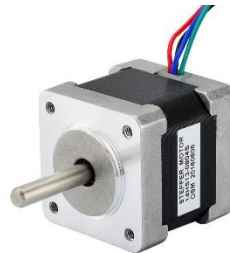
$$\begin{aligned} J_{rhm} &= 0,00000055 + 0,000027 + 0,00000548 + 0,0000008 \\ &= 0,00001883 \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (60)$$

Z vypočtených hodnot můžeme určit potřebný moment motoru k posuvu osou Y podle vzorce:

$$M_{mz} = (J_{rhm} \cdot \epsilon_m) + M_{crm} \quad (61)$$

$$M_{mz} = (0,00001883 \cdot 39,27) + 0,00038 = 0,00171 \text{ Nm} \quad (62)$$

Z výpočtu potřebného momentu pro rozběh osy Y jsme zjistili, že je potřebný minimální moment  $0,00171 \text{ Nm}$  přičemž vybraný motor Nema 14 má moment  $0,2 \text{ Nm}$ . Jelikož je moment motoru větší než potřebný moment, tak vybraný motor vyhovuje.



Obrázek 30: Motor osy Y Nema 14

#### 4.2.4 Popis konstrukce osy Y

Konstrukce osy Y je podobná ose X. Pro zajištění lineárního posuvu byly zvoleny lineární vedení s vozíčky od společnosti HIWIN. Přenos kroutícího momentu z motoru zajišťuje hliníková spojka, která je schopna přenést moment až  $1 \text{ Nm}$ . Vzhledem k maximálnímu momentu od vybraného motoru Nema 14, který je  $0,2 \text{ Nm}$ , je vybraná spojka dostačující. Kuličkový šroub byl vybrán se stoupáním  $2 \text{ mm/ot}$  a s třídou přesnosti C3. Šroub je osazen předepnutou maticí, která vymezuje vůli mezi maticí a šroubem. Tím je zajištěna přesnost a opakovatelnost nastavení polohy během měření. Pro určení koncových poloh byly vybrány mechanické spínače, proto je nutná při prvotním zapnutí přístroje referenční jízda. Poloha se poté přepočítává v softwaru pomocí otáček motoru a známého stoupání kuličkového šroubu. Na spodní straně základny osy Y je vybrání pro o-kroužek, který utěšňuje kontakt mezi základnou a dílem pro napojení hadiček, které zajišťují uchycení vzorku v držáku pomocí podtlaku.

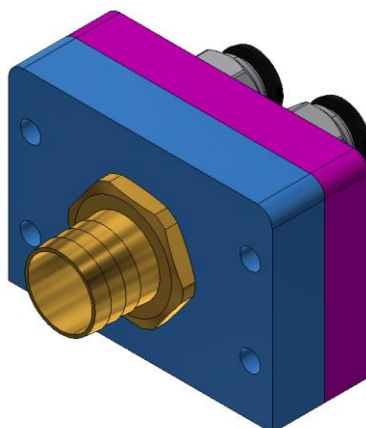
Ve spodní části základny se nachází vybrání pro firemní čtečku pro určení nasazeného držáku vzorků pomocí pružných kontaktů a malého čipu na spodní straně každého držáku vzorků.

#### 4.2.5 Čtečka držáků vzorků

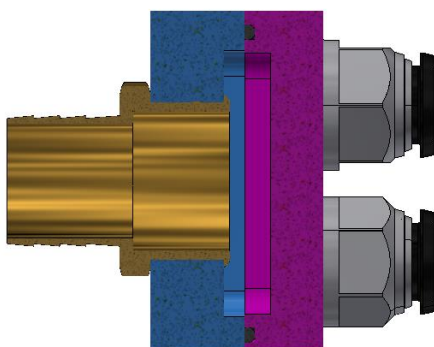
Jelikož držáky vzorků nejsou pro jednu velikost, je důležité, aby byla možná jejich automatická identifikace pomocí elektroniky. K tomuto účelu se využívá systém již používaný pro detekci držáku vzorků v přístroji laserové spektroskopie. Jedná se tištěný spoj s pružnými kontakty, které doléhají na malou destičku tištěného spoje usazeného na spodní straně držáku vzorků. Na destičce umístěné na jednotlivém držáku vzorků se nachází čip s pamětí typu EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory), na který se nahraje označení pro jednotlivý typ vzorku. Výhodou čipu s pamětí EPROM je, že k udržení informací nepotřebuje neustálé napájení. Komunikace mezi pamětí a čtečkou probíhá za použití one-wire protokolu.

#### 4.2.6 Vakuové uchycení vzorků

Pro vakuové uchycení vzorků je vytvořen rozbočovač pro vstup 25 mm hadice od vývěvy na čtyři menší hadičky s průměrem 12 mm. Tyto hadičky byly zvoleny kvůli lepšímu poloměru ohybu, než je pro 25 mm hadici. Tím je dosaženo menší výšky monobloku a celkově manipulátoru.



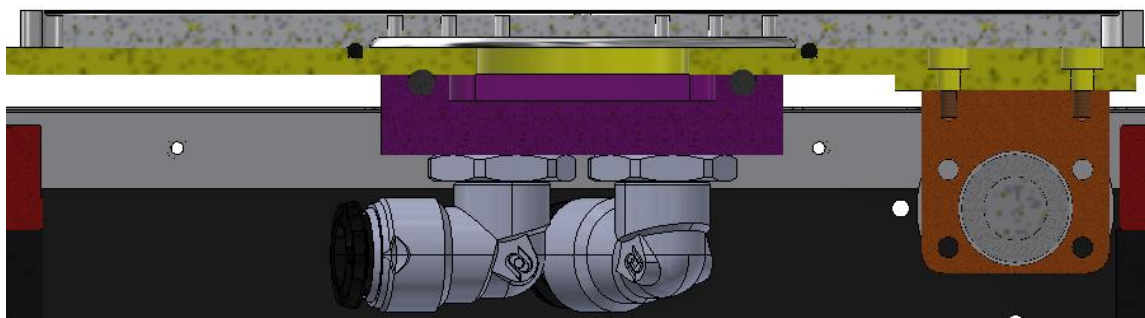
Obrázek 31: Sestava rozbočovače



Obrázek 32: Řez rozbočovačem

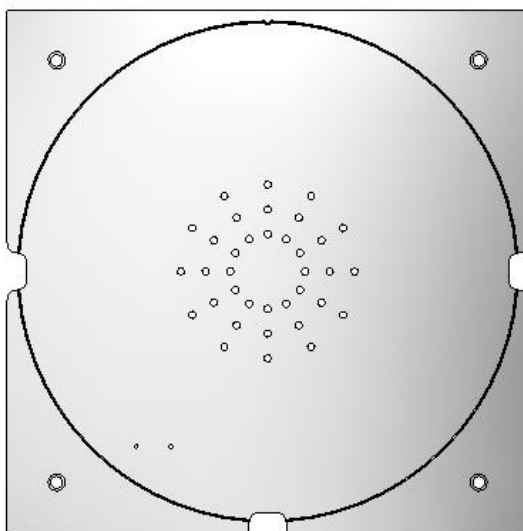
Rozbočovač se skládá ze dvou hliníkových obrobků. Na obrázku 32 jde vidět ve fialovém obrobku vybrání pro o-kroužek, aby bylo zajištěno těsnění sestavy. Uvnitř každého dílu je vybrání, aby byl zajištěn rovnoměrnější odtah vzduchu.

Pro napojení čtyř hadiček na osu Y je vytvořen díl, který lze vidět na obrázku 33 fialovou barvou. V něm jsou namontovány úhlové přípojky stylu push-in pro jednoduché napojení hadiček. Přípojky se mohou volně otáčet při pohybu osy. Pro utěsnění je opět vytvořeno vybrání pro o-kroužek.



Obrázek 33: Řez osou Y s vakuovým upínáním

V základně osy Y je uprostřed vytvořena průchozí díra a na horní straně je zahloubení pro o-kroužek, který zajišťuje mezi těsnost mezi držákem vzorků a zbytkem sestavy. V držáku vzorků je zahloubení, aby bylo zajištěno rovnoměrnější odsávání vzduchu. Na celé oblasti vybrání držáku vzorků jsou vytvořeny díry, které zajistí podtlak na vzorek.



Obrázek 34: Horní strana držáku vzorků pro 8" vzorek



Obrázek 35: Spodní pohled držáku vzorků pro 8" vzorek

Rovnoměrné rozložení děr pro odtah je vhodné z důvodu více bodů, které budou vyrovnávat vzorek do roviny. Vytvoření podtlaku na vzorek je důležité z hlediska zlepšení rovinnosti vzorku a vyrušení jeho zvlnění z výroby. Jelikož se jedná o křemíkový wafer, který je velmi tenký (tloušťka 8" waferu je 725  $\mu\text{m}$ ), tak je možné toho dosáhnout podtlakem. Na obrázku 35 je vidět umístění čtečky pro určení daného typu držáku vzorku.

#### 4.3 Zhodnocení nákladů návrhu

Hlavním faktorem vlastního návrhu bylo snížení celkové ceny. Výsledná cena se skládá z ceny nakupovaných dílů a ceny pro obráběné díly. Cena obráběných dílů zahrnuje i materiál a cenu obrábění. Do výsledné částky byla také započítána mzda pro osobu, která bude manipulátor skládat. V tabulce 14 jsou vypsané ceny jednotlivých obráběných dílů. Tabulka 15 obsahuje nakupované komponenty.

Číslo výkresu	Položka	Počet ks	Cena za ks
D-00221	Základna osy X	1	3 000,00 Kč
D-00223	Základna osy Y	1	3 500,00 Kč
D-00225	Držák ingotu 6"	1	1 760,00 Kč
D-00230	Držák vzorku 6"	1	1 500,00 Kč
D-00232	Držák vzorku 8"	1	2 100,00 Kč
D-00236	Držák ingotu 8"	1	2 250,00 Kč
D-00239	Redukce odtahu 4xG1/2	1	530,00 Kč
D-00240	Rozbočovač odtahu - A	1	460,00 Kč
D-00241	Rozbočovač odtahu - B	1	540,00 Kč
D-00246	Monoblok	1	14 000,00 Kč
D-00247	Úchyt matice osy X	1	340,00 Kč
D-00248	Úchyt motoru osy X	1	670,00 Kč
D-00249	Úchyt motoru osy Y	1	560,00 Kč
D-00250	Úchyt matice osy Y	1	340,00 Kč

Číslo výkresu	Položka	Počet ks	Cena za ks
D-00251	Kryt domečku osy X	1	40,00 Kč
D-00252	Kryt domečku osy Y	1	40,00 Kč
D-00254	Kryt horní - A	2	300,00 Kč
D-00255	Kryt horní - B	1	350,00 Kč
D-00256	Kryt horní - C	1	360,00 Kč
		<b>Celkem</b>	32 940,00 Kč

Tabulka 14: Ceny vyráběných dílů

Název	Počet kusů	Cena za ks	
Motor Nemá 14	1	379,00 Kč	
Motor nemá 23	1	598,00 Kč	
Kuličkový šroub osy X	1	4 300,00 Kč	
Kuličkový šroub osy Y	1	4 200,00 Kč	
Lineární vedení osy X	2	1 300,00 Kč	
Lineární vedení osy Y	2	1 300,00 Kč	
Vozíky lineárního vedení	6	400,00 Kč	
Spojka osy X	1	600,00 Kč	
Spojka osy Y	1	600,00 Kč	
Hadicový trn G1" na hadici 25 mm	1	68,00 Kč	
Push-in úhlová spojka 12 mm	4	100,00 Kč	
Přímá přípojka na hadici 12 mm	4	77,70 Kč	
O-kroužek 306x3 NBR70	1	130,83 Kč	
O-kroužek 215x5 NBR70	1	109,36 Kč	
O kroužek 85x3mm	1	43,64 Kč	
Ložiskový domek FF06	1	440,00 Kč	
Ložiskový domek SLA06	1	590,00 Kč	
Koncové spínače	4	20,00 Kč	
Spojovací materiál	-	300,00 Kč	
		<b>Celkem</b>	20 749,63 Kč

Tabulka 15: Ceny nakupovaných dílů

Při započítání položky pro osobu skládající manipulátor ve dvou dnech s celkovým ohodnocením 2 500 Kč se dostaneme na částku 56 189,63 Kč. Tato částka je konečná pro vlastní návrh osy. Kdyby bylo využito dostupných komerčních řešení částka by se pohybovala nad hranicí 200 tisíc, protože samotné osy pro posuv stojí kolem 100 tisíc jedna. Vlastní řešení je tedy ekonomicky mnohem výhodnější.

## 5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posouzení komerčně dostupných řešení na trhu a případné implementace vakuového uchytávání vzorků. Možnosti úprav stávajících řešení s ohledem na požadavky rozsahu posuvu a přesnosti nastavení polohy. Následně vytvoření vlastního návrhu řešení s jednoduchým připojením vývěvy a s minimalizací zástavbových prostor. Návrh byl následně zpracován ve 3D modelovacím softwaru Inventor s použitím komponent, které splňují podmínky získané z výpočtů.

V první kapitole se věnuji komerčním řešením a možnostem připevnění vakuového uchycení vzorků. Jako referenční hodnotu pro zatížení jsem použil maximální hmotnost vzorku, který bude na manipulátor umístován a hmotnost vlastního řešení získanou z aplikace Inventor s ohledem na materiál (hliník).

V druhé kapitole se věnuji jednotlivým komponentům, které se využívají při návrhu a konstrukci pohyblivých strojů. Jedná se o lineární vedení a jejich typy s přihlédnutím k výhodám a nevýhodám. Využití kuličkových šroubů pro přenos rotačního pohybu hřídele motoru na pohyb přímočarý, jejich typy ovlivněny výrobními procesy a vymezení vůle mezi šroubem a jeho maticí. Dále se zabývám různými typy senzorů pro určování polohy stroje a jejich výhodami i nevýhodami.

Ve třetí kapitole se nachází vlastní návrh jednotlivých os manipulátoru s výpočty pro zatížení vozíků, krokových motorů a jejich potřebného momentu a kuličkového šroubu pro osu X a Y. Pro pohyb byly zvoleny kuličkové šrouby s předepnutou maticí, se stejným stoupáním a stejné třídy přesnosti, aby bylo zajištěno přesné polohování os při chodu přístroje. Po poptání dílů a zpracování částky za jednotlivé nakupované komponenty bylo zhodnoceno ekonomické hledisko vlastního návrhu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Direct Drive Linear Translation Stage. *Standa.lt* [online]. 2020 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: [https://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=596&prod=Direct-Drive-Linear-Translation-Stage](https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=596&prod=Direct-Drive-Linear-Translation-Stage)
- [2] *Zaber.com* [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.zaber.com/manuals/X-LRT-AEC>
- [3] *Cactux.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://cactux.cz/saguarox/>
- [4] ZEMČÍK, M. Návrh a analýza křížového stolu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Tůma, Ph.D.
- [5] Structure of Stepper Motors. *Orientalmotor.com* [online]. 2020 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>
- [6] Jak funguje servomotor a zpětnovazební řízení. *Raveo.cz* [online]. 2011 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/jak-funguje-servomotor-a-zpetnovazebni-rizeni>
- [7] How Servo Motors Work. *Kollmorgen.com* [online]. 2011 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: [https://www.kollmorgen.com/en-us/blogs/\\_blog-in-motion/articles/how-servo-motors-work/](https://www.kollmorgen.com/en-us/blogs/_blog-in-motion/articles/how-servo-motors-work/)
- [8] [online]. Dostupné z: Lineární versus kluzné vedení | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-versus-kluzne-vedeni>
- [9] *Střední škola elektrotechnická, Ostrava, Na Jízdárně 30, p. o.* [online]. Copyright © [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: [https://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v\\_prez\\_ss\\_4.pdf](https://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_4.pdf)
- [10] Jak fungují optické snímače. *Object moved* [online]. Copyright © [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguji-opticke-snimace--36979>
- [11] [online]. Copyright © 2bQPZ [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: [https://cdn.sick.com/media/familyoverview/8/28/428/familyOverview\\_DFS60\\_g244428\\_cs.pdf](https://cdn.sick.com/media/familyoverview/8/28/428/familyOverview_DFS60_g244428_cs.pdf)
- [12] SICK SENSOR INTELLIGENCE. *TTK70, Přehled produktových řad* [online]. [cit. 15.5.2022]. Dostupný na WWW: [online]. Copyright © 2bQPZ [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: [https://cdn.sick.com/media/familyoverview/8/28/428/familyOverview\\_DFS60\\_g244428\\_cs.pdf](https://cdn.sick.com/media/familyoverview/8/28/428/familyOverview_DFS60_g244428_cs.pdf)

- [13] Katalog-Lineární vedení. [https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-hg-qh/17\\_vozik-hgh](https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-hg-qh/17_vozik-hgh) [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/download/52e770cfa4746e4979684217bbf8b3b3>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$F_{G1}$	[N]	tíhová síla těžiště T1
$F_{G2}$	[N]	tíhová síla těžiště T2
$F_{G3}$	[N]	tíhová síla těžiště T3
$F_{G4}$	[N]	tíhová síla těžiště T4
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	tíhové zrychlení
$m$	[kg]	hmotnost
T1	[-]	těžiště tělesa 1
T2	[-]	těžiště tělesa 2
T3	[-]	těžiště tělesa 3
T4	[-]	těžiště tělesa 4
$P_1$	[N]	zatížení vozíku 1
$P_2$	[N]	zatížení vozíku 2
$P_3$	[N]	zatížení vozíku 3
$P_4$	[N]	zatížení vozíku 4
$W$	[N]	tíhová síla celkového zatížení osy X
$a$	[mm]	vzdálenost těžiště
$b$	[mm]	vzdálenost těžiště
$c$	[mm]	rozteč kolejnic
$d$	[mm]	rozteč vozíků
$d$	[mm]	průměr kuličkového šroubu
$d_k$	[mm]	malý průměr kuličkového šroubu
$P$	[mm]	stoupání kuličkového šroubu
$C_{dyn}$	[N]	dynamická únosnost
$C_o$	[N]	statická únosnost
$D_{nmax}$	[-]	maximální otáčkový faktor
$k_d$	[-]	koeficient uložení
$k_k$	[-]	koeficient závislosti uložení
$l_d$	[mm]	vzdálenost mezi ložisky

$l_k$	[mm]	nepodepřená délka hřídele
$v_r$	[m/min]	rychloposuv
$t_p$	[s]	doba rozběhu
$\alpha_x$	[°]	úhel sklonu vedení
$m_{kx}$	[kg]	celková maximální hmotnost
$n_r$	[ot/min]	maximální otáčky kuličkového šroubu
$n_k$	[ot/min]	kritické otáčky kuličkového šroubu
$n_{max}$	[ot/min]	maximální konstrukční otáčky
$F_{ks}$	[N]	axiální síla působící na šroub
$F_{kd}$	[N]	síla působící při rozběhu motoru
$F_k$	[N]	maximální teoretická dovolená síla
$F_{kmax}$	[N]	maximální dovolená axiální síla na šroub
$d_n$	[-]	otáčkový faktor
$\eta_1$	[-]	účinnost valivého vedení
$\eta_2$	[-]	účinnost uložení kuličkového šroubu
$\eta_3$	[-]	účinnost kuličkového šroubu s maticí
$\eta_c$	[-]	celková účinnost
$f_1$	[-]	součinitel tření ve vodících plochách
$f_2$	[-]	ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu
$n_{max}$	[ot/min]	maximální otáčky
$P_m$	[W]	výkon motoru
$M_m$	[Nm]	statický moment motoru
$J_{mot}$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti motoru
$m_m$	[kg]	hmotnost motoru
$M_{stat}$	[Nm]	potřebný statický moment motoru
$a$	[m/s <sup>2</sup> ]	lineární zrychlení
$\varepsilon_m$	[rad/s <sup>2</sup> ]	úhlové zrychlení motoru
$J_{ks}$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti kuličkového šroubu

$J_s$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti spojky
$m_s$	[kg]	hmotnost spojky
$R$	[mm]	vnější poloměr spojky
$r$	[mm]	vnitřní poloměr spojky
$J_m$	[kgm <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti přesouvaných hmot
$M_g$	[Nm]	moment od přenesených hmot
$F_p$	[N]	síla předeprnutí kuličkového šroubu
$M_{zks}$	[Nm]	ztrátový moment kuličkového šroubu
$M_{crm}$	[Nm]	celkový moment redukováný na hřídel motoru
$J_{rhm}$	[kgm <sup>2</sup> ]	celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru
$M_{mz}$	[Nm]	potřebný moment motoru
$M_x$	[Nm]	zátěžový moment vozíku v ose X
$t_r$	[s]	doba rozběhu

## Seznam příloh

Příloha 1:	D-00220	Sestava manipulátoru
Příloha 2:	D-00221	Základna osy X
Příloha 3:	D-00223	Základna osy Y
Příloha 4:	D-00225	Držák ingotu 6“
Příloha 5:	D-00230	Držák vzorku 6“
Příloha 6:	D-00232	Držák vzorku 8“
Příloha 7:	D-00236	Držák ingotu 8“
Příloha 8:	D-00239	Redukce odtahu 4xG1/2
Příloha 9:	D-00240	Rozbočovač odtahu – A
Příloha 10:	D-00241	Rozbočovač odtahu – B
Příloha 11:	D-00246	Monoblok
Příloha 12:	D-00247	Úchyt matice osy X
Příloha 13:	D-00248	Úchyt motoru osy X
Příloha 14:	D-00249	Úchyt motoru osy Y
Příloha 15:	D-00250	Úchyt matice osy Y
Příloha 16:	D-00251	Kryt domečku osy X
Příloha 17:	D-00252	Kryt domečku osy Y
Příloha 18:	D-00254	Kryt horní – A
Příloha 19:	D-00255	Kryt horní – B
Příloha 20:	D-00256	Kryt horní – C

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Motorizovaná osa výrobce Standa 8MTL1401-300 .....	11
Obrázek 2: stage X-LRT0250AL-AE53C .....	13
Obrázek 3: Thorlabs DDS300 .....	13
Obrázek 4: CactuX SaguaroX M.....	14
Obrázek 5: Řez krokovým motorem .....	16
Obrázek 6: Vertikální řez vinutím krokového motoru .....	16
Obrázek 7: Schéma řízení servomotoru.....	17
Obrázek 8: Schéma zpětnovazebných smyček motoru .....	17
Obrázek 9: Kluzné vedení HENNLICH .....	18
Obrázek 10: Příklad lineárního valivého vedení .....	19
Obrázek 11: Schéma rozložení vysílače a přijímače optického snímače .....	20
Obrázek 12: Inkrementální enkodér DLS40.....	21
Obrázek 13: Profily kuličkového šroubu – a) broušený profil, b) okružovaný profil, c) válcovaný.....	22
Obrázek 14: Matice kuličkového šroubu.....	23
Obrázek 15: Axiální zatížení osy X [13].....	24
Obrázek 16: Vzdálenosti těžišť úchytů motorů .....	25
Obrázek 17: Lineární vedení osy X značky HIWIN .....	26
Obrázek 18: Kuličkový šroub osy X .....	28
Obrázek 19: Schéma uspořádání osy X.....	29
Obrázek 20: Spojka motoru a kuličkového šroubu .....	31
Obrázek 21: Motor osy X .....	32
Obrázek 22: Zatížení vozíků osy Y [13] .....	33
Obrázek 23: Řez modelem osou Y .....	34
Obrázek 24: Čelní řez osou Y.....	34
Obrázek 25: Maximální vyosení zátěže.....	35
Obrázek 26: Označení působících momentů na vozík [13].....	35
Obrázek 27: Ilustrační obrázek kuličkového šroubu osy Y.....	37
Obrázek 28: Schéma uložení komponent osy Y.....	38
Obrázek 29: Ilustrační obrázek spojky osy Y.....	40
Obrázek 30: Motor osy Y Nema 14.....	41
Obrázek 31: Sestava rozbočovače .....	42
Obrázek 32: Řez rozbočovačem .....	42
Obrázek 33: Řez osou Y s vakuovým upínáním .....	43
Obrázek 34: Horní strana držáku vzorků pro 8" vzorek.....	43
Obrázek 35: Spodní pohled držáku vzorků pro 8" vzorek .....	44

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Ceny komerčního řešení.....	15
Tabulka 2: Vzdálenost těžišť a tíhová síla.....	25
Tabulka 3: Parametry kuličkového šroubu.....	26
Tabulka 4: Tabulka účinností lineárního vedení osy X.....	29
Tabulka 5: Tabulka parametrů motoru Nema 23.....	29
Tabulka 6: Momenty setrvačnosti komponent osy X.....	30
Tabulka 7: Rozměry a hmotnost spojky osy X.....	30
Tabulka 8: Hodnoty veličin osy Y.....	34
Tabulka 9: Přehled parametrů kuličkového šroubu osy Y.....	36
Tabulka 10: Tabulka účinností lineárního vedení osy Y.....	38
Tabulka 11: Parametry motoru osy Y.....	38
Tabulka 12: Tabulka momentů setrvačností osy Y.....	39
Tabulka 13: Hodnoty veličin spojky osy Y.....	39
Tabulka 14: Ceny vyráběných dílů.....	45
Tabulka 15: Ceny nakupovaných dílů.....	45