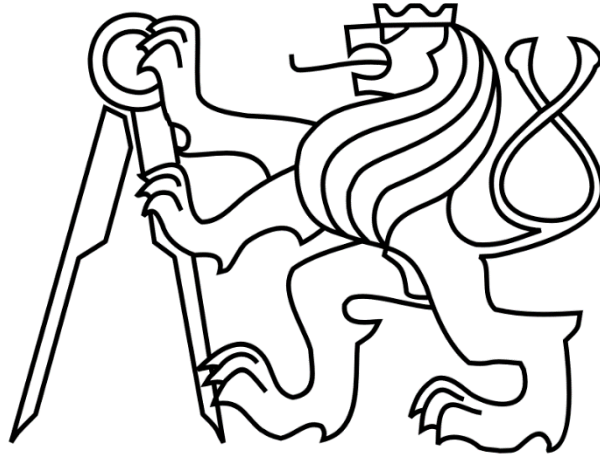


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Zařízení pro automatické skenování zakřivených
ploch pro ultrazvukové zkoušení materiálů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

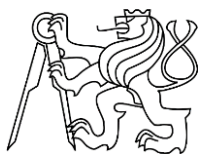
Děkuji doc. Ing. Vladimíru Andrlíkovi, CSc. za odborné vedení bakalářské práce a za cenné rady. Rád bych poděkoval Ing. Radku Salačovi Svobodovi z firmy ATG za užitečné rady. Dále bych chtěl poděkovat všem, co mi byli oporou během celého studia, především mým rodičům.

Anotace

Jméno autora:	Jiří Nýč
Název diplomové práce:	Zařízení pro automatické skenování zakřivených ploch pro ultrazvukové zkoušení materiálů
Rozsah diplomové práce:	75 stran, 16 tabulek, 44 obrázků
Školní rok vyhotovení:	2017-2018
Škola:	České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Andrlík Vladimír, CSc
Konzultant:	Ing. Radek Salač
Zadavatel tématu:	Atg s.r.o
Klíčová slova:	Skenovací zařízení, zakřivené plochy, ultrazvukové skenování
Anotace:	Diplomová práce je zaměřena na vytvoření automatizovaného skenovacího zařízení pro skenování zakřivených ploch pro ultrazvukové skenování.

Annotation

Author:	Jiří Nýč
Title of the diploma thesis:	Devices for automatic scanning of curved surfaces for ultrasonic testing of materials.
Extent:	75 pages, 16 tables, 44 figures
Academic Year:	2017-2018
University:	The Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 - Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	doc. Ing Andrlík Vladimír, CSc
Consultant:	Ing. Radek Salač
Submitter of the Theme:	Atg s.r.o.
Date of Handover:	13.7.2018
Keywords:	Scanning equipment, curved surfaces, ultrasonic scanning
Annotation:	The diploma thesis is focused on creating an automated scanning device for scanning curved surfaces for ultrasonic scanning.



Obsah

1. Úvod.....	12
1.1 Zadání.....	12
1.2 Cíl práce.....	13
2. Popis dané technologie	14
2.1 Metoda průchodová.....	14
2.2 Metoda odrazová	15
2.3 Squirter sondy	16
3. Rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů	17
3.1 Klasifikace průmyslových robotů a manipulátorů	17
3.2 Rozdělení manipulačních zařízení dle složitosti a stupně řízení:.....	17
3.3 Univerzální manipulátory	18
3.4 Rozdělení manipulačních zařízení dle kinematické struktury.....	18
3.4.1 Sériová kinematická struktura	18
3.4.2 Paralelní kinematická struktura	18
3.4.3 Hybridní kinematická struktura	18
4. Jednoúčelové manipulátory.....	19
4.1 INDETEC ndt s.r.o:	19
4.2 TECSCAN s.r.o:	19
5. Výrobci průmyslových robotů.....	20
5.1 Firma ABB s.r.o	20
5.1.1 Robot ABB IRB 2600ID – 8/2.00.....	20
5.1.2 Robot ABB IRB 2600 – 12/1.85	21
5.2 Firma Kuka s.r.o.....	22
5.2.1 Robot Kuka KR 12 R1810	22
5.2.2 Robot Kuka KR 8 R2100 arc HW.....	23
5.3 Firma Yaskawa s.r.o	24
5.3.1 Robot Yaskawa HP 20D – 6	24
5.4 Firma Stäubli s.r.o	25
5.4.1 Robot Stäubli RX 160L.....	25



5.5	Firma Fanuc s.r.	26
5.5.1	Robot Fanuc M – 10iA/8L	26
5.6	Porovnání průmyslových robotů.....	27
6.	Externí osa od výrobců průmyslových robotů	29
6.1	Lineární pojezd ABB IRBT 2005	29
6.1.1	Lineární pojezd Kuka KL 250 – 3	30
6.1.2	Lineární pojezd Yaskawa TLS 1000	30
7.	Návrhy řešení	32
7.1	Návrh skenovacího zařízení č.1	32
7.2	Návrh skenovacího zařízení č.2	34
7.3	Návrh skenovacího zařízení č.3	36
7.4	Návrh skenovacího zařízení č.4	38
7.5	Návrh skenovacího zařízení č.5	40
7.6	Výběr optimální varianty.....	41
8.	Konstrukční návrh výsledné varianty.....	42
8.1	Pohybová jednotka osy X	43
8.1.1	Výpočet pohybové jednotky	43
8.1.2	Konstrukce pohybové jednotky	48
8.2	Pohybová jednotka osy Y	52
8.2.1	Výpočet pohybové jednotky	52
8.2.2	Konstrukce pohybové jednotky	57
8.3	Pohybová jednotka osy Z	60
8.3.1	Výpočet pohybové jednotky	60
8.3.2	Konstrukce pohybové jednotky	65
8.4	Polohovací jednotka skenovací hlavice.....	68
9.	Závěr a zhodnocení.....	69
10.	Seznamy.....	70
10.1	Použitá literatura	70
10.2	Seznam obrázků.....	71
10.3	Seznam tabulek	73
10.4	Seznam použitého software	73



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ú 12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení

10.5	Seznam příloh	74
------	---------------------	----



Přehled použitých veličin a jednotek

a_1	Zrychlení	[m.s ⁻²]
a_3	Brzdění	[m.s ⁻²]
C	Dynamická únosnost vozíku	[N]
b_i	Šířka pera	[m]
C	Dynamická únosnost ložiska	[N]
C_{DYN}	Dynamická únosnost kuličkového šroubu	[N]
C_0	Statická únosnost vozíku	[N]
d	Průměr roztečné kružnice ozubeného kola	[m]
d_a	Průměr hlavové kružnice ozubeného kola	[m]
d_b	Průměr základní kružnice ozubeného kola	[m]
d_f	Průměr patní kružnice ozubeného kola	[m]
d_j	Jmenovitý průměr hřídele ozubeného kola	[m]
d_k	Vypočtený průměr hřídele kuličkového šroubu	[m]
d_{kk}	Tabulkový průměr hřídele kuličkového šroubu	[m]
F_k	Maximální teoretická síla kuličkového šroubu	[N]
F_m	Střední zátěž kuličkového šroubu	[N]
F_{max}	Maximální dovolená síla kuličkového šroubu	[N]
f_s	Statický faktor kuličkového šroubu	[N]
f_w	Faktor zatížení kuličkového šroubu	[N]
g	Gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
h	Zdvih	[m]
h_a	Výška hlavy zubu	[m]
h_f	Výška paty zubu	[m]
$i_{přev}$	Převodový poměr převodovky	[-]
i_c	Celkový převodový poměr	[-]
k_k	Koeficient závislosti na uložení kuličkového šroubu	[-]
L	Nominální životnost kuličkového šroubu	[-]
l_1	Vzdálenost mezi vozíky	[m]
L_1	Nominální životnost vozíku 1	[m]
l_2	Vzdálenost mezi kolejnicemi	[m]
L_2	Nominální životnost vozíku 2	[m]
l_3	Vzdálenost mezi středem břemene a působící silou v Y-ové ose	[m]
L_3	Nominální životnost vozíku 3	[m]
l_4	Vzdálenost mezi středem břemene a působící silou v X-ové ose	[m]
L_4	Nominální životnost vozíku 4	[m]
l_d	Vzdálenost mezi ložisky	[m]



L_h	Provozní životnost kuličkového šroubu	[hod]
L_{h1}	Provozní životnost vozíku 1	[hod]
L_{h2}	Provozní životnost vozíku 2	[hod]
L_{h3}	Provozní životnost vozíku 3	[hod]
L_{h4}	Provozní životnost vozíku 4	[hod]
l_k	Nepodepřená délka hřídele	[m]
m	Hmotnost	[kg]
M_k	Kroutící moment	[Nm]
M_m	Moment motoru	[Nm]
m_n	Normálový modul	[m]
n	Počet cyklů	[-]
n	Otáčky motoru	[min^{-1}]
n_m	Střední otáčky kuličkového šroubu	[min^{-1}]
P	Stoupání kuličkového šroubu	[m]
P	Výkon	[W]
P_{E1}	Ekvivalentní zátěž vozíku 1	[N]
P_{E2}	Ekvivalentní zátěž vozíku 2	[N]
P_{E3}	Ekvivalentní zátěž vozíku 3	[N]
P_{E4}	Ekvivalentní zátěž vozíku 4	[N]
P_m	Výkon motoru	[W]
P_{m1}	Střední zátěž vozíku 1	[N]
P_{m2}	Střední zátěž vozíku 2	[N]
P_{m3}	Střední zátěž vozíku 3	[N]
P_{m4}	Střední zátěž vozíku 4	[N]
P_p	Příkon	[W]
t_1	Čas pro zrychlení	[s]
t_2	Čas pro rovnoměrný pohyb	[s]
t_3	Čas pro brždění	[s]
t_c	Celkový čas na jedno projetí	[s]
t_{c1}	Celkový čas	[s]
v	Rychlost	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
x_1	Dráha pro zrychlení	[m]
x_2	Dráha pro rovnoměrný pohyb	[m]
x_3	Dráha pro brždění	[m]
z	Počet zubů ozubeného kola	[-]
α_n	Normálový úhel ozubení	[°]
β	Úhel sklonu zubu	[°]
η	Účinnost ozubeného převodu	[-]

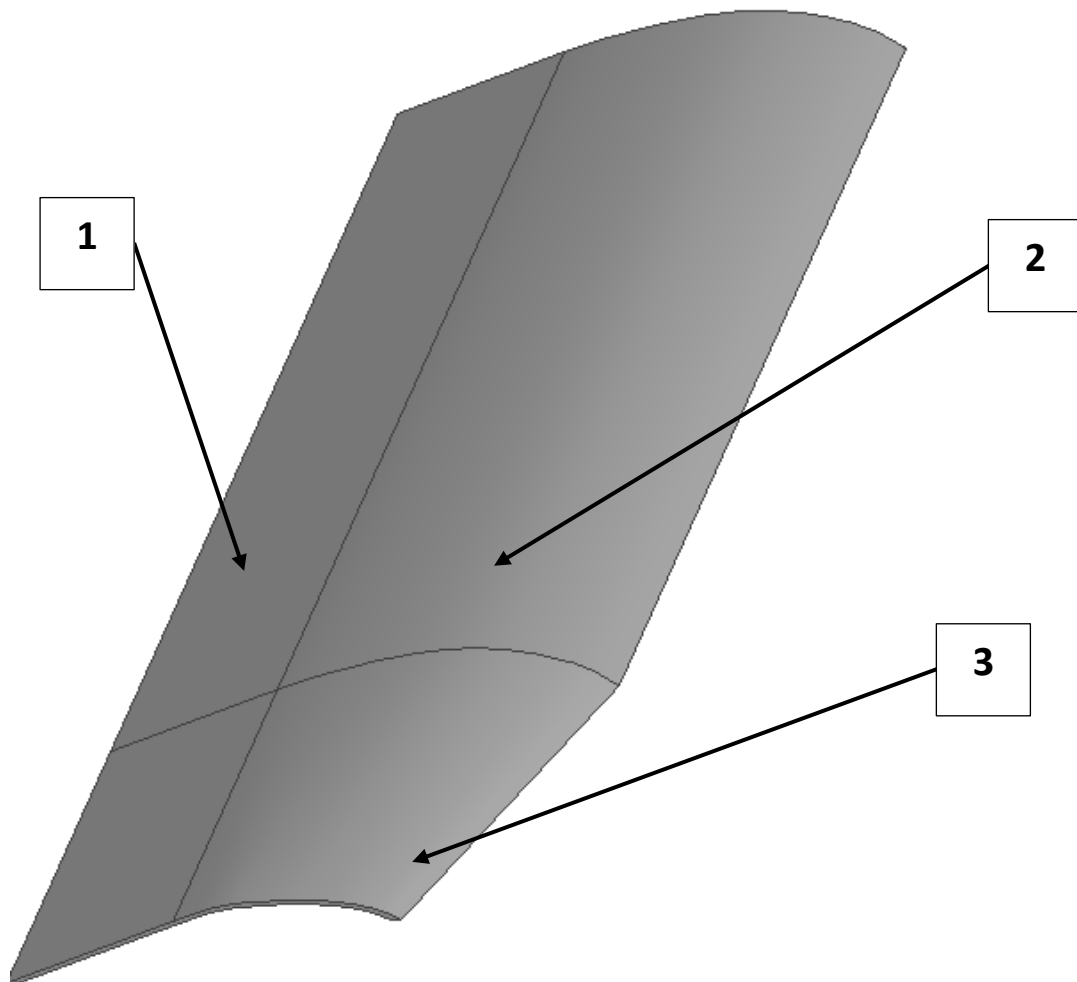


1. Úvod

1.1 Zadání

Skenovaným dílem je letecká klapka křídla AIRBUSU A380. Hmotnost skenovací hlavice je přibližně 5 kg. Na skenovaném dílu je vytvořena skenovací mřížka o rozměrech 6x6 mm. Přesnost najetí do požadované polohy má být $\pm 0,3$ mm, při rychlosti skenování 1 – 2 m/s.

Skenovací zařízení má být univerzální pro použití pro více druhů skenovaných dílů o rozdílných rozměrech. Klapka křídla AIRBUSU A380 je z rozměrově maximálním možným měřeným dílem na tomto zařízení.



Obr. 1.1 - 3D model klapky křídla AIRBUSU A380

Na Obr. 1.1 je znázorněn 3D model klapky křídla AIRBUSU A380, která je vyrobena z kompozitních materiálů. Na obr. je vidět, že klapka se skládá ze 3 hlavních částí. První část je lineární (1), druhá část má jednoduché zakřivení (2) a třetí část je zakřivená a sešikmená část klapky (3).



1.2 Cíl práce

Cílem této práce je vytvoření zařízení pro automatické skenování zakřivených ploch pro ultrazvukové zkoušení materiálu neboli defektoskopické zkoušky. Budou zpracovány koncepční návrhy variant možného řešení automatického skenování. Následně bude zpracování optimální varianta daného řešení ve 3D modelu. Bude provedena výpočtová část pohybových jednotek jednotlivých os skenovacího zařízení. Vytvoření vizualizace trajektorie pohybů skenování. Provedení kinematického rozboru. Zpracování vybraných dílců do výkresové dokumentace.



2. Popis dané technologie

[1]

V této kapitole, jsou popsány principy vhodných metod ultrazvukového skenování.

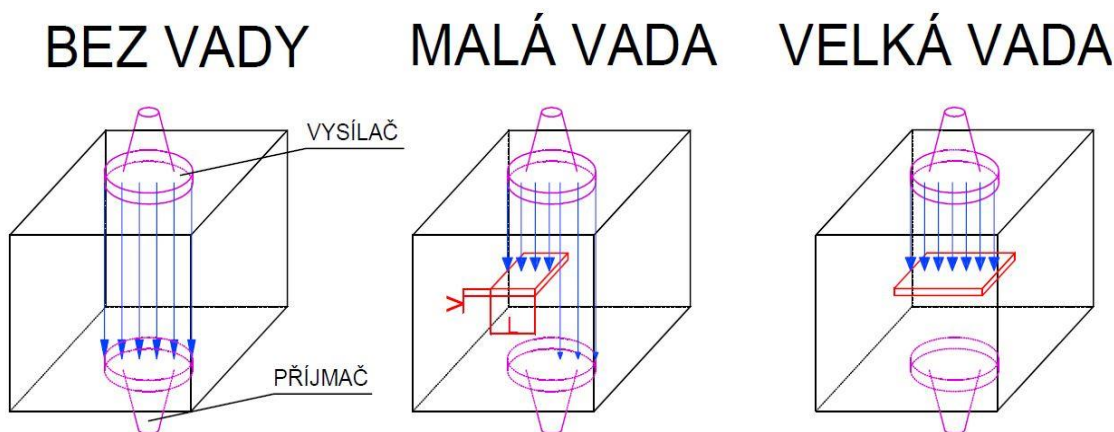
2.1 Metoda průchodová

Na Obr. 2.1 je schematicky znázorněna průchodová metoda ultrazvukového skenování. V této metodě se používají dvě sondy, jedna sonda má funkci přijímače, a druhá sonda má funkci vysílače. Tato metoda má nevýhodu takovou, že je potřeba přístup k oběma stranám skenovaného dílce.

Na prvním obrázku je znázorněn materiál, který v sobě neobsahuje žádnou vnitřní vadu. To znamená, že ultrazvukový signál vyslaný ze sondy, která má funkci vysílače projde v neutlumeném stavu až na konec materiálu, kde ho zachytí sonda, která má funkci přijímače.

Na druhém obrázku je materiál, který obsahuje vnitřní vadu menší, než je svazek ultrazvukového signálu. To znamená, že vysílač vyšle ultrazvukový signál, který se cestou skrz materiál utlumí a na konci ho přijímač přijme jako utlumený ultrazvukový signál.

Na posledním obrázku je materiál, který obsahuje vnitřní vadu větší nebo rovnu, než je svazek ultrazvukového signálu. To znamená, že vysílač vyšle ultrazvukový signál, který se cestou k přijímači skrz skenovaný materiál úplně utlumí.



Obr. 2.1 – Průchodová metoda



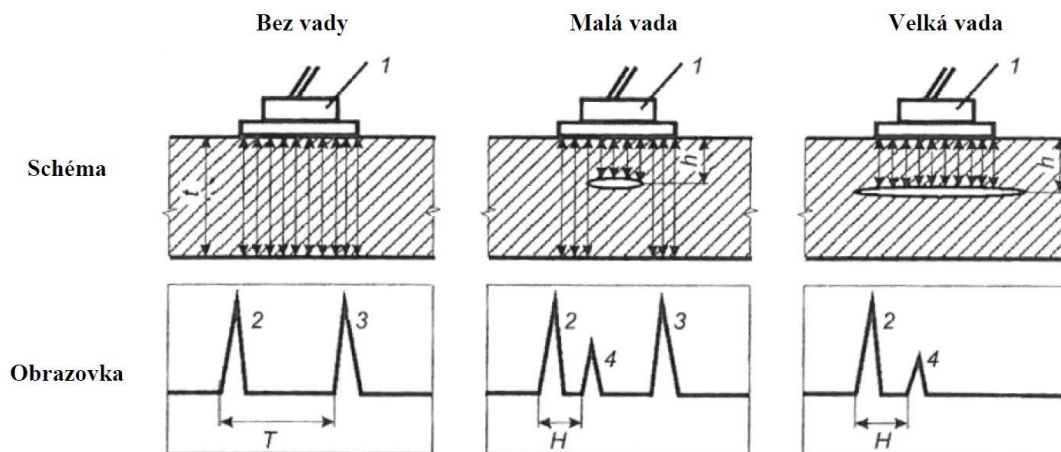
2.2 Metoda odrazová

Na Obr. 2.2 je schematicky znázorněna odrazová metoda ultrazvukového skenování. V této metodě se používá jedna sonda, která má funkci jednak přijímače, tak zároveň má funkci vysílače.

Na první obrázku je znázorněn materiál, který v sobě neobsahuje žádnou vnitřní vadu. To znamená, že ultrazvukový signál vyslaný z vysílače se odrazí na spodní části skenovaného dílu a vrátí se zpět do přijímače. Na výsledném echu je znázorněna špička při vstupu ultrazvukového signálu do materiálu a poté je znázorněna špička při odrazu ultrazvukového signálu od spodní hrany dílu.

Na druhém obrázku je znázorněn materiál, který v sobě obsahuje vnitřní vadu menší, než je svazek ultrazvukového signálu. To znamená, že ultrazvukový signál vyslaný z vysílače se odrazí částečně od vnitřní vady a částečně od spodní části skenovaného dílu a vrátí se zpět do přijímače. Na výsledném echu je znázorněna špička při vstupu ultrazvukového signálu do materiálu, ve vzdálenosti H se vyskytne menší špička, která znázorňuje vnitřní vadu ve stejné hloubce H od povrchu materiálu. Nakonec se ve výsledném echu objeví poslední špička, která znázorňuje odraz ultrazvukového signálu od spodní části materiálu.

Na posledním obrázku je znázorněn materiál, který v sobě obsahuje vnitřní vadu větší nebo rovnu, než je velikost svazku ultrazvukového signálu. To znamená, že ultrazvukový signál vyslaný z vysílače se celý odrazí od vnitřní vady zpět do přijímače. Na výsledném echu jsou potom znázorněny pouze dvě špičky. První špička znázorňuje ultrazvukový signál vstupující do materiálu. Druhá špička je menší než první a ta znázorňuje odrazení se ultrazvukového signálu od vnitřní vady. Na tomto echu chybí poslední špička, která znázorňuje odraz ultrazvukového signálu od spodní části materiálu.



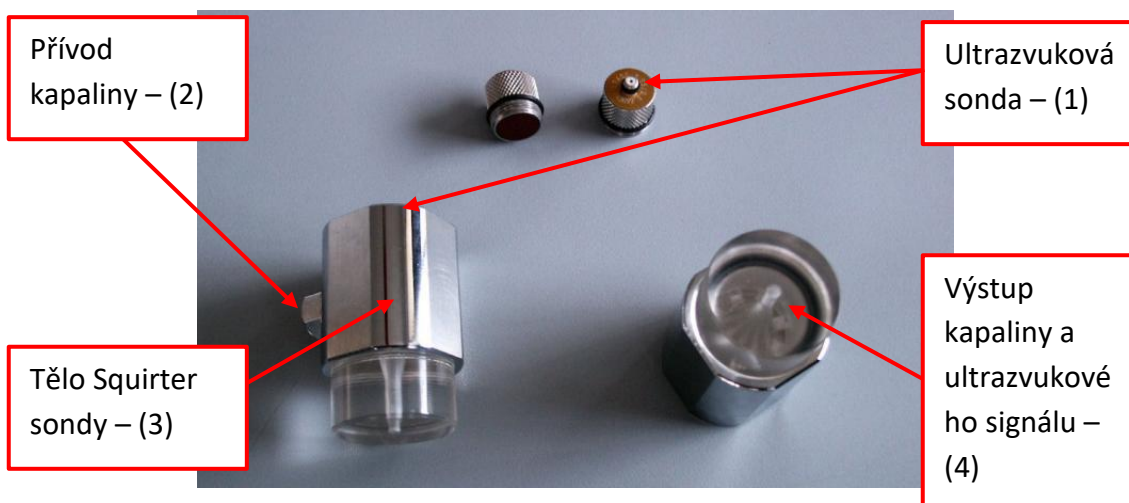
Obr. 2.2 – Metoda odrazová



2.3 Squirter sondy

Squirter sondy se používají pro rozměrně velké dílce, kde by byla nákladná imerzní metoda ultrazvukového skenování, kdy jsou jak skenovaný dílec, tak ultrazvukové sondy ponořeny ve vodě. Voda se používá z důvodu dobrého šíření zvuku v kapalině. Každá firma si vyvíjí vlastní Squirter sondy. Hlavním problémem Squirter sond je proudění kapaliny skrz obal. Zde nesmí dojít k turbulentnímu proudění, z důvodu utlumení ultrazvukového signálu před vstupem do skenovaného materiálu. Pro to si každá firma vyvíjí vlastní obaly na tyto sondy, aby dosáhli laminárního proudění kapaliny.

Na Obr. 2.3 jsou znázorněny Squirter sondy firmy IMG Ultrasuoni. Na čele je umístěna ultrazvuková sonda (1) kolem, které obtéká kapalina. Kapalina je přiváděna přívodem (2). V těle Squirter sondy (3) se proudění kapaliny změní z turbulentního na laminární. Nakonec kapalina i s ultrazvukovým signálem vystupuje ven z Squirter sondy (4) a dopadá na povrch skenovaného materiálu.



Obr. 2.3 – Squirter sondy

[3]



3. Rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů

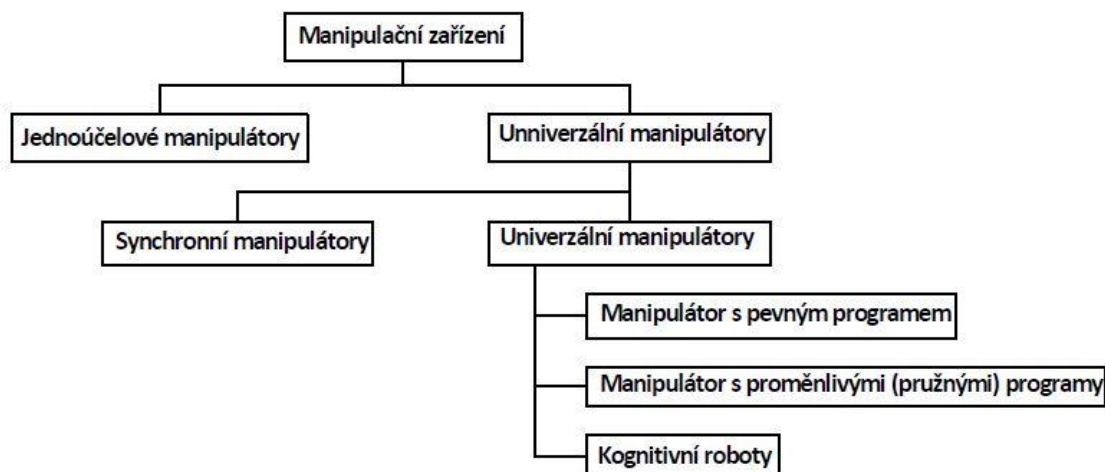
[2]

V této kapitole je popsána teorie automatizačních zařízení, které je možné využít pro návrh automatizačního skenovacího zařízení.

3.1 Klasifikace průmyslových robotů a manipulátorů

Manipulátor, automatická ruka, robot či univerzální podávací zařízení, jsou názvy pro univerzální automatizované zařízení, které vykonává pohyby obdobné pohybům lidské paže či ruky. Ve spojení s výrobními a pracovními stroji se uplatňují manipulátory při vkládání polotovarů. Dále se používají při manipulačních operacích u strojů pro tlakové lití, obráběcích strojů, elektrických pecí. Také při provádění povrchových úprav a tvářecích prací, při operacích nakládky a vykládky u dopravníků. Dále jsou použity pro montáž, balení výrobků a v celé řadě dalších technologických operací. Možnost použití vhodných úchopných členů a podtlakových zařízení, které umožňují jejich použití i pro manipulaci s křehkými a různě tvarovanými polotovary a výrobky.

3.2 Rozdělení manipulačních zařízení dle složitosti a stupně řízení:



Obr. 3.1 – Rozdělení manipulačních zařízení

Na Obr. 3.1 je znázorněno základní rozdělení manipulačních zařízení podle složitosti provedení a stupně řízení.



3.3 Univerzální manipulátory

Univerzální manipulátory nejsou závislé na stroji, který obsluhují. Jsou vybaveny vlastním programovatelným ústrojím. Proti jednoúčelovým manipulátorům jsou univerzální manipulátory konstrukčně složitější. Výhodou tohoto typu manipulátoru je možnost použití na odlišných pracovištích. Univerzální manipulátory mohou obsluhovat více strojů současně. Pro uchopení předmětů se používají jednoúčelové úchopné hlavice, které jsou přizpůsobeny tvaru předmětu a jejich rozměrům. Mezi univerzální manipulátory patří synchronní manipulátory, manipulátory s pevným programem, manipulátory s proměnlivým programem.

3.4 Rozdělení manipulačních zařízení dle kinematické struktury

Manipulační zařízení se dělí podle uspořádání kinematické struktury na sériovou a paralelní kinematickou strukturu.

3.4.1 Sériová kinematická struktura

Roboty se sériovou kinematickou strukturou mají malou zástavbovou plochu, jejich pracovní prostor se dá rozšířit pomocí portálů, pojezdů atd. Jejich opakovatelná přesnost klesá s délkou ramene a „vyložením“ ramene. Mají menší tuhost než paralelní manipulátory. Jedná se o otevřenou kinematickou strukturu. Jsou nejvyužívanější především v automobilovém průmyslu.

3.4.2 Paralelní kinematická struktura

Roboty s paralelní kinematickou strukturou jsou konstrukčně řešeny tří (tripod) až šesti (hexapod) vzpěrnou strukturou. Mají dobrou přesnost polohování, vyšší přesnost a vysokou užitečnou hmotnost než roboty se sériovou kinematickou strukturou. Průmyslové roboty a manipulátory s paralelní kinematickou strukturou jsou tvořeny bází, platformou, rameny, klouby a pohony. Jejich nevýhodou je relativně malý pracovní prostor a možnost kolizí vzpěr a singulární polohy vzpěr.

3.4.3 Hybridní kinematická struktura

Hybridní kinematická struktura připomíná na první pohled strukturu paralelní. Posouzení stavby a uspořádání je často velmi sporné a velká část těchto mechanismů je tudíž řazena do skupin paralelní struktury. V mnohých případech nebývají ani samostatně rozlišovány.



4. Jednoúčelové manipulátory

V této kapitole jsou popsány výrobci jednoúčelových manipulačních zařízení. Tyto zařízení jsou pro imerzní ultrazvukové skenování, kdy se skenovaný díl a ultrazvukové sondy ponoří do kapaliny. Jedná se tedy zařízení menších rozměrů, pro menší skenované díly.

4.1 INDETEC ndt s.r.o:

[9]

Na Obr. 4.1 je znázorněn souřadnicový manipulátor od firmy INDETEC ndt s.r.o pro imerzní ultrazvukové testování dílů. Toto zařízení využívá průchodovou skenovací metodu s 3-osou manipulací. Osa Z se manuálně nastavuje podle výšky měřeného dílu.



Obr. 4.1 - Souřadnicový manipulátor od Firmy INDETEC ndt

4.2 TECSCAN s.r.o:

[10]

Na Obr. 4.2 je znázorněn ultrazvukový manipulátor od firmy TECSCAN s.r.o. Tento manipulátor se používá pro imerzní metody ultrazvukového testování. Tento manipulátor využívá odrazové skenovací metody. Jedná se o 3-osý manipulátor.



Obr. 4.2 - Ultrazvukový manipulátor od firmy TECSCAN s.r.o



5. Výrobci průmyslových robotů

V této kapitole jsou popsáni vytipovaní jednotliví výrobci průmyslových robotů a jejich vhodné produkty, které se dají použít jako nosiče skenovací hlavičky. Pro ultrazvukové skenování jsou vhodné průmyslové roboty určené pro metodu svařování. Hlavním kritériem výběru je nosnost 5kg. Rozsah průmyslového robota přibližně 2000 mm. Přesnost polohování má být $\pm 0,3$ mm. Průmyslové roboty se vyrábí v provedení ustavení na podlahu, stěnu, nakloněnou stěnu a strop.

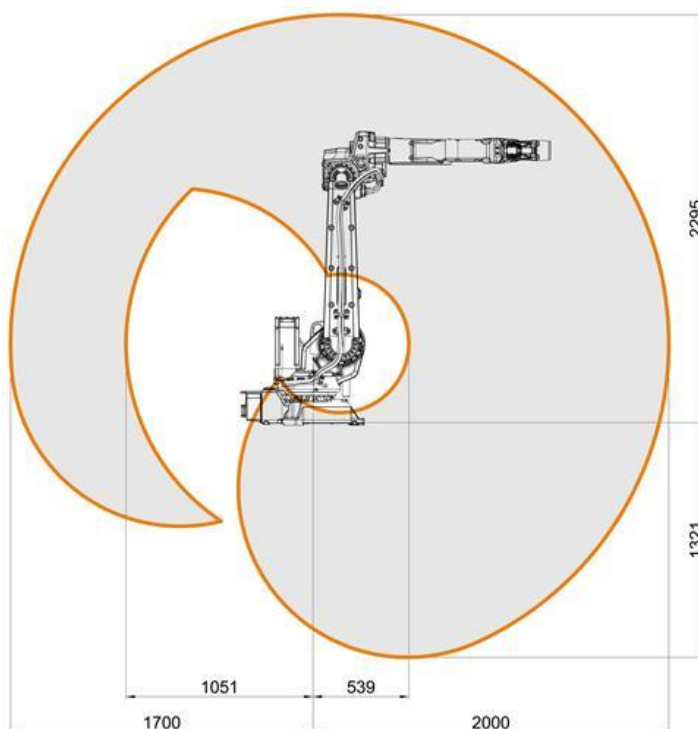
5.1 Firma ABB s.r.o

[4]

Firma ABB s.r.o se sídlem v České republice v Praze, má podporu po celém světě, dále má velký výběr produktů.

5.1.1 Robot ABB IRB 2600ID – 8/2.00

Na Obr. 5.1 je znázorněn robot ABB IRB 2600ID – 8/2.00, který je určený pro obsluhu strojů, manipulaci s materiálem a obloukové svařování. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota. Manipulační nosnost je 8 kg. Dosah ramene činní 2000 mm. Jeho opakovatelnost polohy je 0,023 – 0,026 mm, opakovatelnost najetí cesty činní 0,27 – 0,3 mm. Rychlost nejpomalejší osy je 175 °/s. Stupeň ochrany podstavce (base) a spodního ramene je IP 67, stupeň ochrany horního ramene je IP 54. Tento robot je napájen 200 – 600 V při frekvenci 50 – 60 Hz. Rozměry podstavce robota jsou 675x511 mm a výška robota pro přepravu činní 1600 mm. Robot je řízen pomocí řídicího systému IRC5.

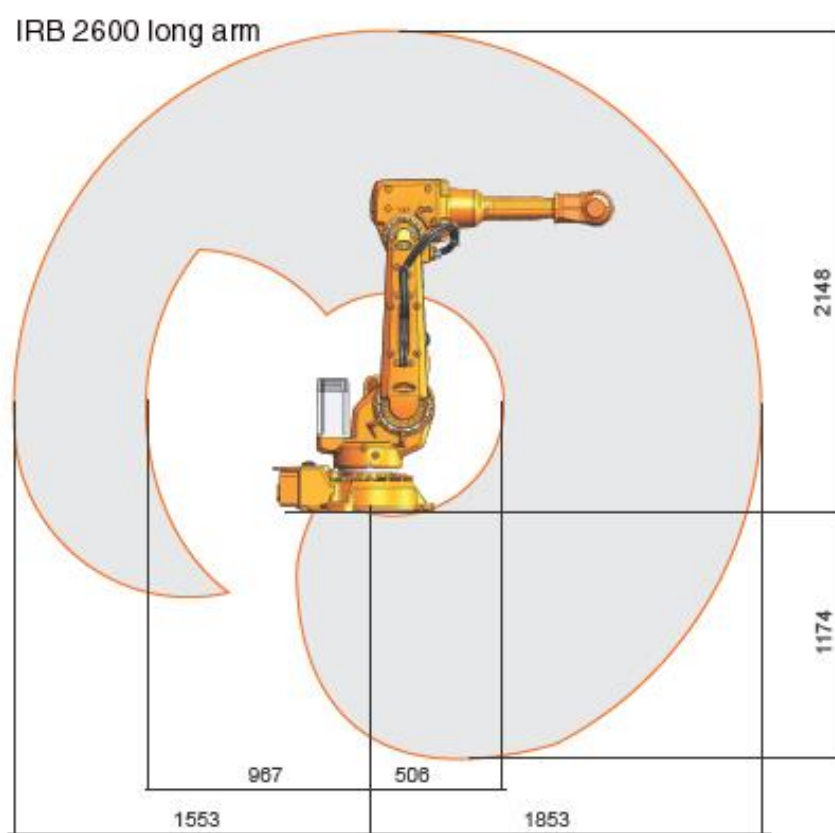


Obr. 5.1 – Robot ABB IRB 2600ID – 8/2.00



5.1.2 Robot ABB IRB 2600 – 12/1.85

Na Obr. 5.2 je znázorněn robot ABB IRB 2600 – 12/1.85, který je určený pro obsluhu strojů, manipulaci s materiálem a obloukové svařování. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota, k tomuto robotu se dají se připojit další 3 externí osy. Manipulační nosnost robota činí 12 kg a dosah ramene činí 1850 mm. Opakovatelnost polohy je 0,04 mm, opakovatelnost najeť cesty činí 0,16 mm. Rychlost nejpomalejší osy je 175 °/s. Stupeň ochrany je IP 67. Tento robot je napájen 200 – 600 V při frekvenci 50 – 60 Hz. Rozměry podstavce robota jsou 676x511 mm a výška robota pro přepravu činí 1582 mm. Robot je řízen pomocí řídicího systému IRC5.



Obr. 5.2 – Robot ABB IRB 2600 – 12/1.85



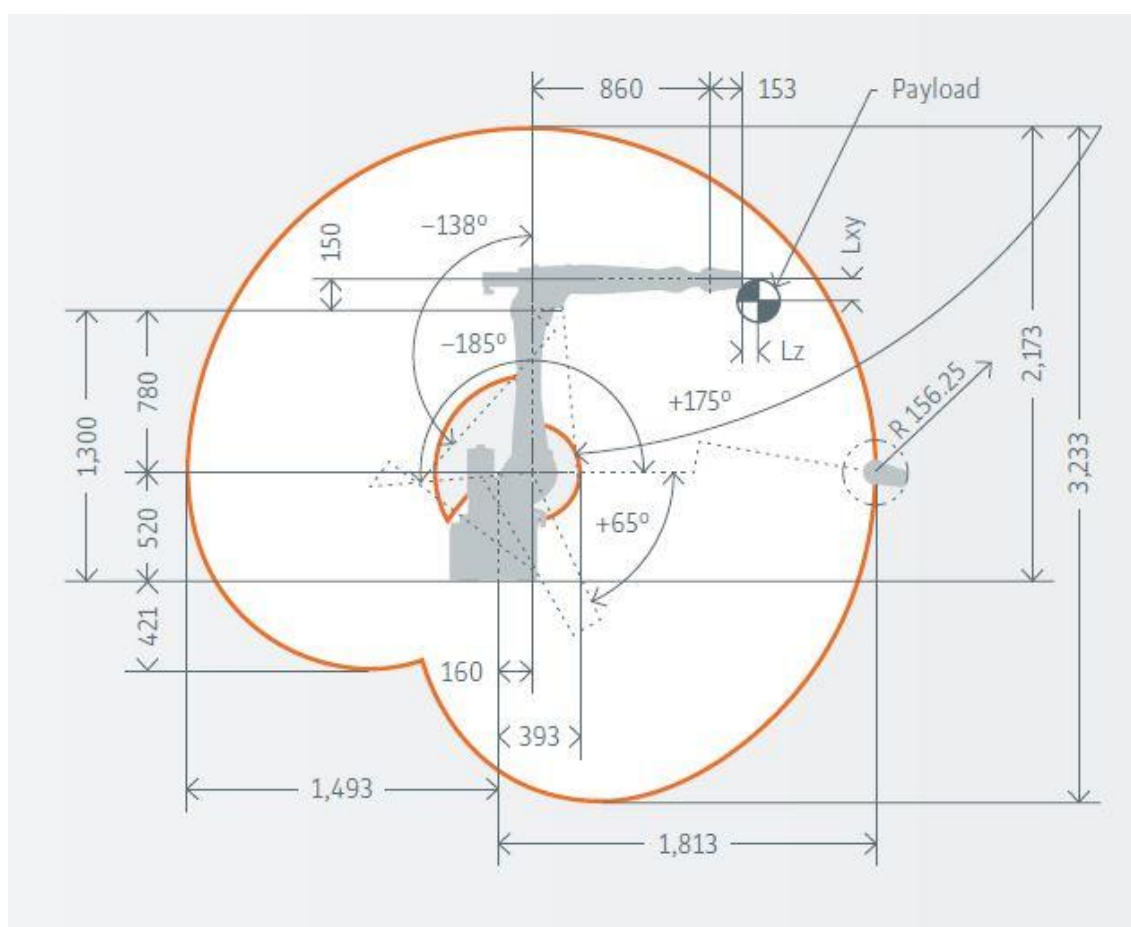
5.2 Firma Kuka s.r.o

[5]

Firma Kuka s.r.o se sídlem v České republice poblíž Prahy, má podporu po celém světě.

5.2.1 Robot Kuka KR 12 R1810

Na Obr. 5.3 je znázorněn robot Kuka KR 12 R1810, který je určený pro manipulaci s komponenty, automatizovanou montáž a paletizaci, stejně jako pro svařovací procesy. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota. Manipulační nosnost je 10 kg. Dosah ramene činní 1810 mm. Jeho opakovatelnost polohy je 0,04 mm. Stupeň ochrany je IP 65. Rozměry podstavce robota jsou 430x380 mm.

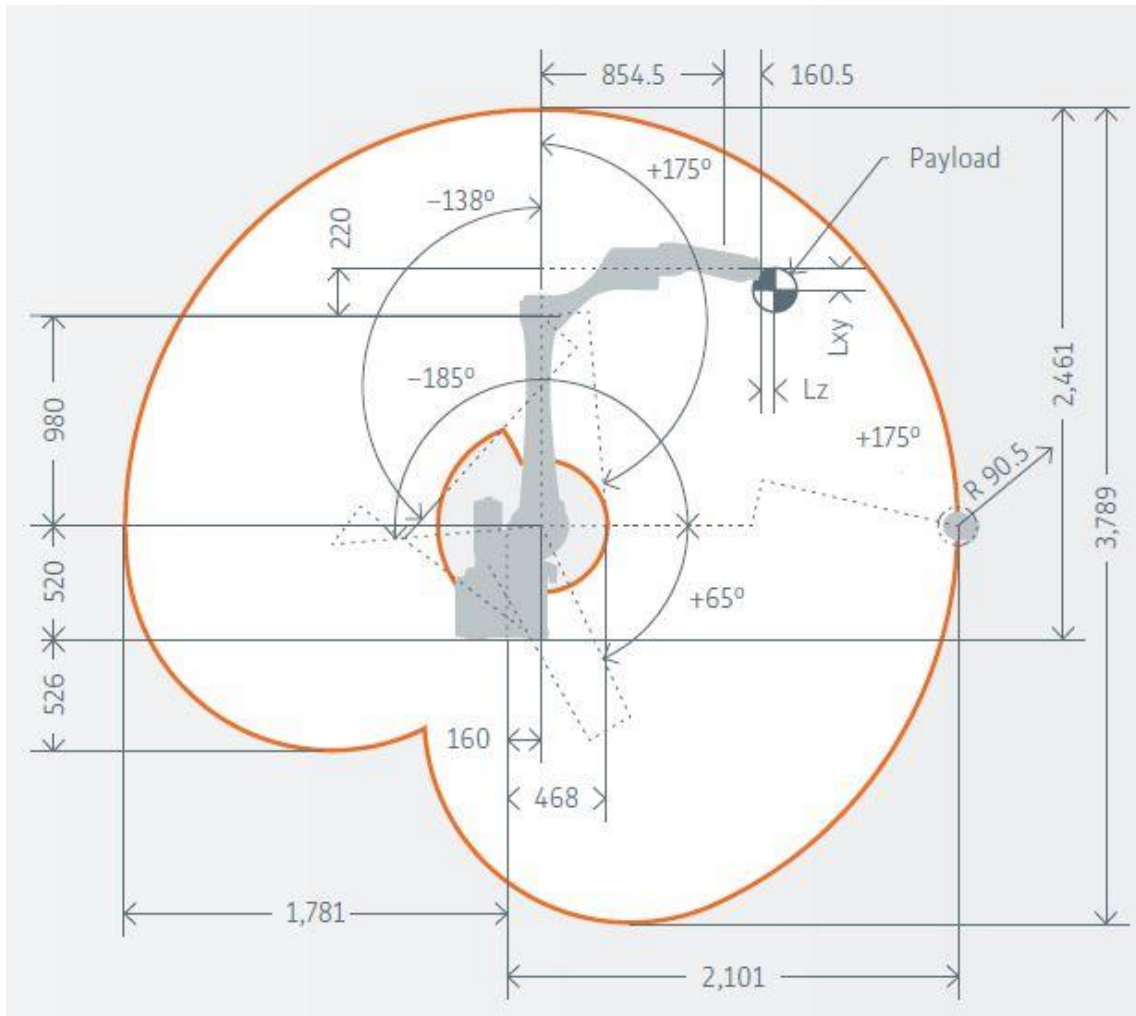


Obr. 5.3 – Robot Kuka KR 12 R1810



5.2.2 Robot Kuka KR 8 R2100 arc HW

Na Obr. 5.4 je znázorněn robot Kuka KR 8 R2100 arc HW, který je určený pro manipulaci s komponenty, automatizovanou montáž a paletizaci, stejně jako pro svařovací procesy. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota. Manipulační nosnost je 8 kg. Dosah ramene činí 2100 mm. Jeho opakovatelnost polohy je 0,04 mm. Stupeň ochrany je IP 65. Rozměry podstavce robota jsou 430x380 mm.



Obr. 5.4 – Robot Kuka KR 8 R2100 arc HW



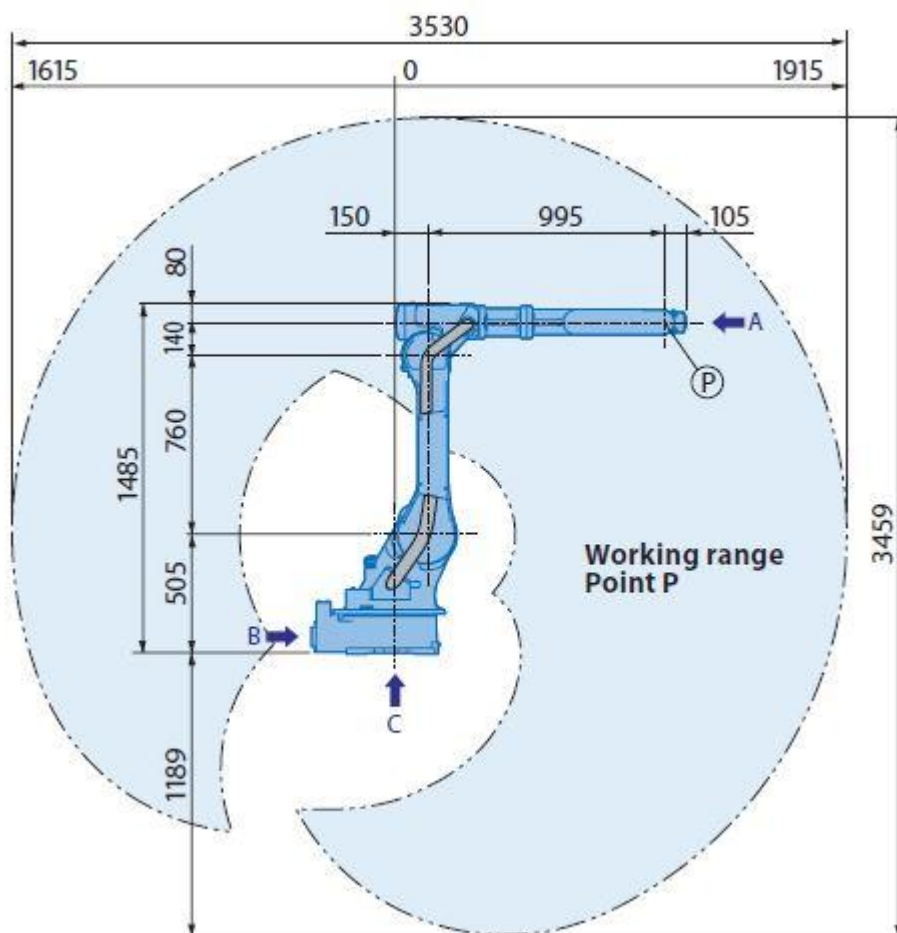
5.3 Firma Yaskawa s.r.o

[6]

Firma Yaskawa s.r.o se sídlem v České republice poblíž Prahy, má podporu po celém světě.

5.3.1 Robot Yaskawa HP 20D – 6

Na Obr. 5.5 je znázorněn robot Yaskawa HP 20D – 6, který je určen pro obloukové svařování, montáž, řezání, manipulaci atd. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota. Manipulační nosnost je 6 kg. Dosah ramene činní 1915 mm. Jeho opakovatelnost polohy je 0,06 mm. Rychlost nejpomalejší osy je 175 °/s. Rozměry podstavce robota jsou 513x375 mm.



Obr. 5.5 – Robot Yaskawa HP 20D – 6



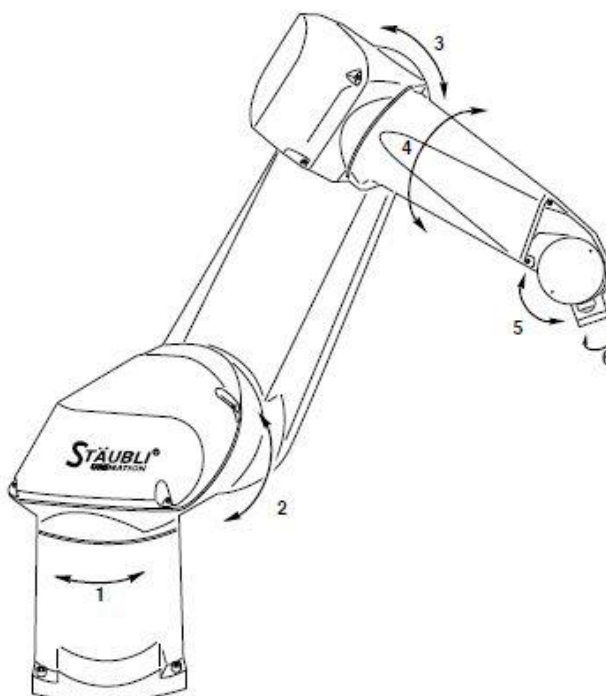
5.4 Firma Stäubli s.r.o

[7]

Firma Stäubli s.r.o se sídlem v České republice v Pardubicích, má podporu po celém světě.

5.4.1 Robot Stäubli RX 160L

Na Obr. 5.6 je znázorněn robot Stäubli RX 160L, který je určen pro paletizaci, lepení, inspekce, řezání atd. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota. Manipulační nosnost je 14 kg. Dosah ramene činní 2010 mm. Rychlost nejpomalejší osy je 200 °/s . Jeho opakovatelnost polohy je 0,05 mm. Rozměry podstavce robota jsou 384x343 mm. Robot je řízen pomocí řídicího systému C S8 C.



Obr. 5.6 – Robot Stäubli RX 160L



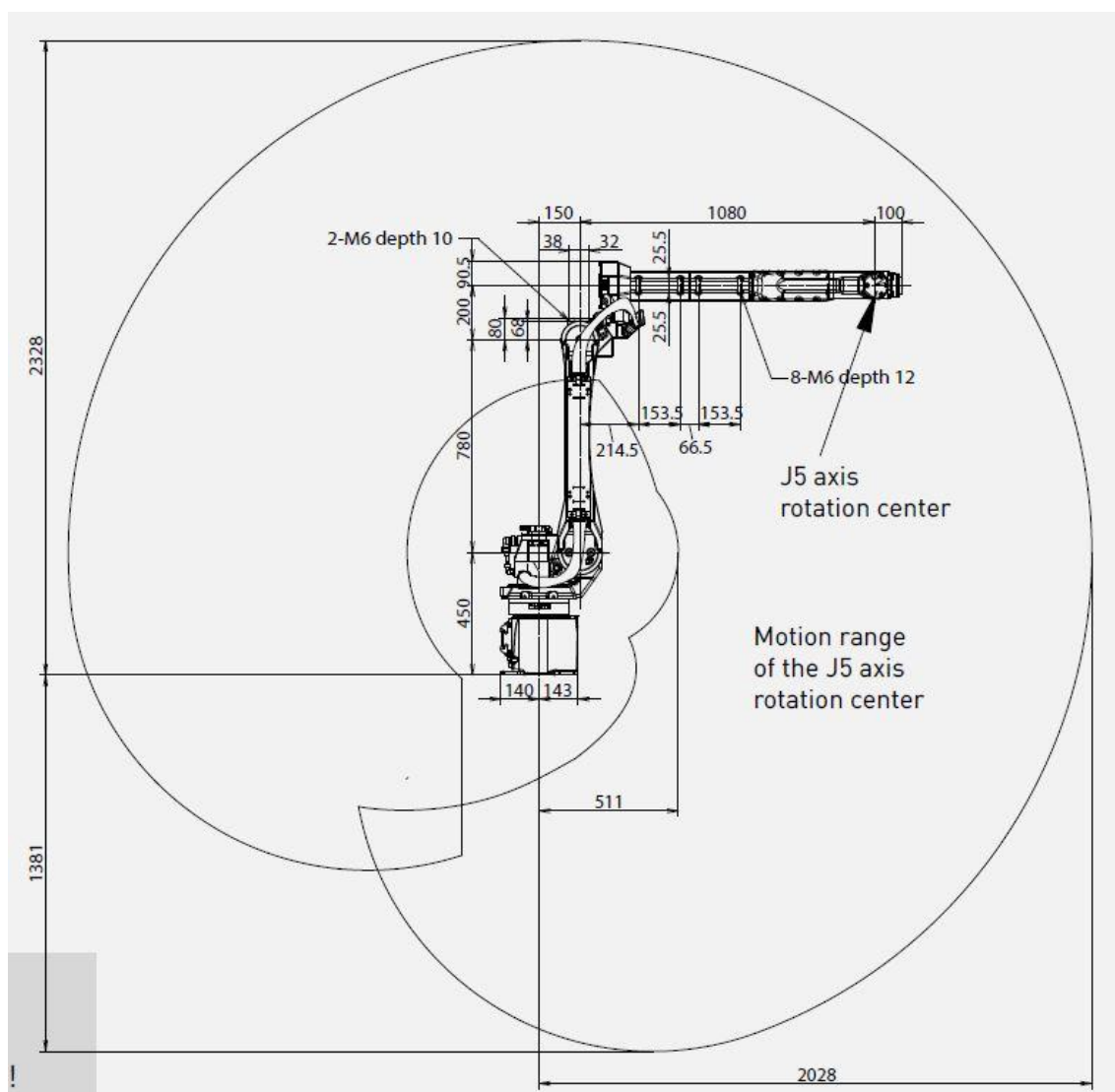
5.5 Firma Fanuc s.r.o

[8]

Firma Fanuc s.r.o se sídlem v České republice v Praze, má podporu po celém světě.

5.5.1 Robot Fanuc M – 10iA/8L

Na Obr. 5.7 je znázorněn robot Fanuc M – 10iA/8L, který je určen pro manipulaci s materiálem. Jedná se o 6-ti osého průmyslového robota. Manipulační nosnost je 8 kg. Dosah ramene činní 2028 mm. Jeho opakovatelnost polohy je 0,04 mm. Rozměry podstavce robota jsou 283x283 mm. Robot je řízen pomocí řídicího systému R – 30iB.



Obr. 5.7 – Robot Fanuc M – 10iA/8L



5.6 Porovnání průmyslových robotů

V této kapitole jsou shrnuty parametry průmyslových robotů. Podle nosnosti ramene, rozsahu ramene, opakovatelnosti polohy, zástavbových rozměrů, ceně a další. Tyto parametry jsou hlavními pro výběr vhodného průmyslového robota pro tuto danou technologii.

V Tab. 5.1 jsou srovnány průmyslové roboty z předchozí části do tabulky dle parametrů jednotlivých robotů

Model Parametr	ABB IRB 2600 ID – 8/2.00	ABB IRB 2600 – 12/1.85	KUKA KR 12 R1810	KUKA KR 8 R2100 arc HW
Nosnost [kg]	8	12	12	8
Rozsah [mm]	2000	1850	1813	2100
Opakovatelnost polohy [mm]	±0,023	±0,04	±0,04	±0,04
Zástavbové rozměry [mm]	511x675	511x676	380x430	380x430
Nejmenší rychlost [°/s]	175	175	175	175
Řídící systém	IRC5	IRC5	-	-
Stupeň ochrany	IP 67	IP 67	IP 65	IP 65
Frekvence odměřování			41-69 [Hz]	41-69 [Hz]
Způsob odměřování	Pomocí rezolverů na jednotlivých osách	Pomocí rezolverů na jednotlivých osách	Pomocí enkodérů na motoru	Pomocí enkodérů na motoru
Přesnost MASTER and SLAVE [mm]	±0,046	±0,08	±0,08	±0,08
Cena [EUR]	29 100	28 400	41 000	40 000

Tab. 5.1 - Tabulka srovnání průmyslových robotů dle parametrů



Model Parametr	YASKAWA HP 20D - 6	STAUBLI RX 160L	FANUC M – 10iA/8L
Nosnost [kg]	6	14	8
Rozsah [mm]	1915	2010	2028
Opakovatelnost polohy [mm]	±0,06	±0,05	±0,04
Zástavbové rozměry [mm]	375x513	343x384	283x283
Nejmenší rychlost [°/s]	175	200	-
Řídící systém	-	CS8C	R – 30iB
Stupeň ochrany	-	-	-
Frekvence odměřování	-	-	2 ¹⁹ [pulsu/otačku]
Způsob odměřování	Absolutní odměřování pomocí enkodérů na jednotlivých motorech	Pomocí enkodérů na motoru	Optické enkodér na motoru
Přesnost MASTER and SLAVE [mm]	± 0,12	±0,1	± 0,08
Cena [EUR]	21 000	-	29 800

Tab. 5.1 – Pokračování



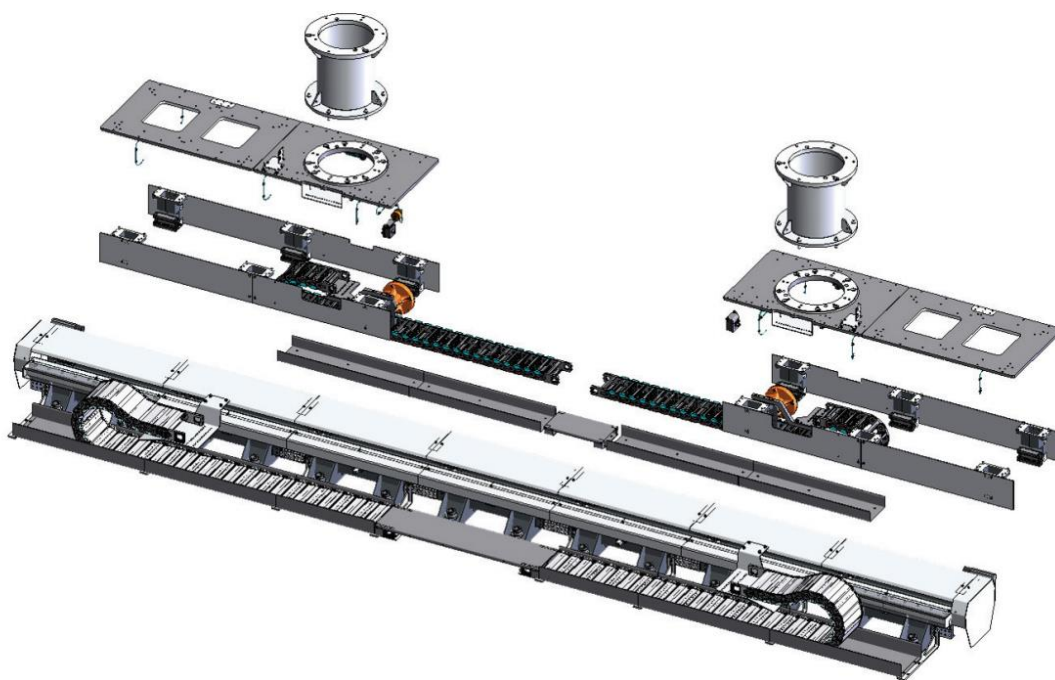
6. Externí osa od výrobců průmyslových robotů

Tato kapitola je zaměřena na externí osy tzv. pojezdy, neboli sedmou osu průmyslových robotů. Z důvodu potřeby dlouhého pojezdu, kvůli rozměrů klapky křídla AIRBUSU A380 je potřeba průmyslového robota usadit na sedmou osou. Tyto osy dodávají výrobci průmyslových robotů.

6.1 Lineární pojezd ABB IRBT 2005

[4]

Na Obr. 6.1 je znázorněn pojezd ABB IRBT 2005, který se skládá ze standardního 1 metr dlouhého modulu. Délka pojezdu je od 2 metrů do 21 metrů složených z jednotlivých modulů. Moduly se dodávají ve standardní nekrytované verzi anebo ve verzi krytované. Rychlost pojezdu ABB IRBT 2005 je 2 m/s. Jeho opakovatelnost polohy je $\leq \pm 0,05$ mm. Šířka pojezdu je 700 mm, výška je 450 mm. Délka přepravního stolu pro robot činí 2209 mm.



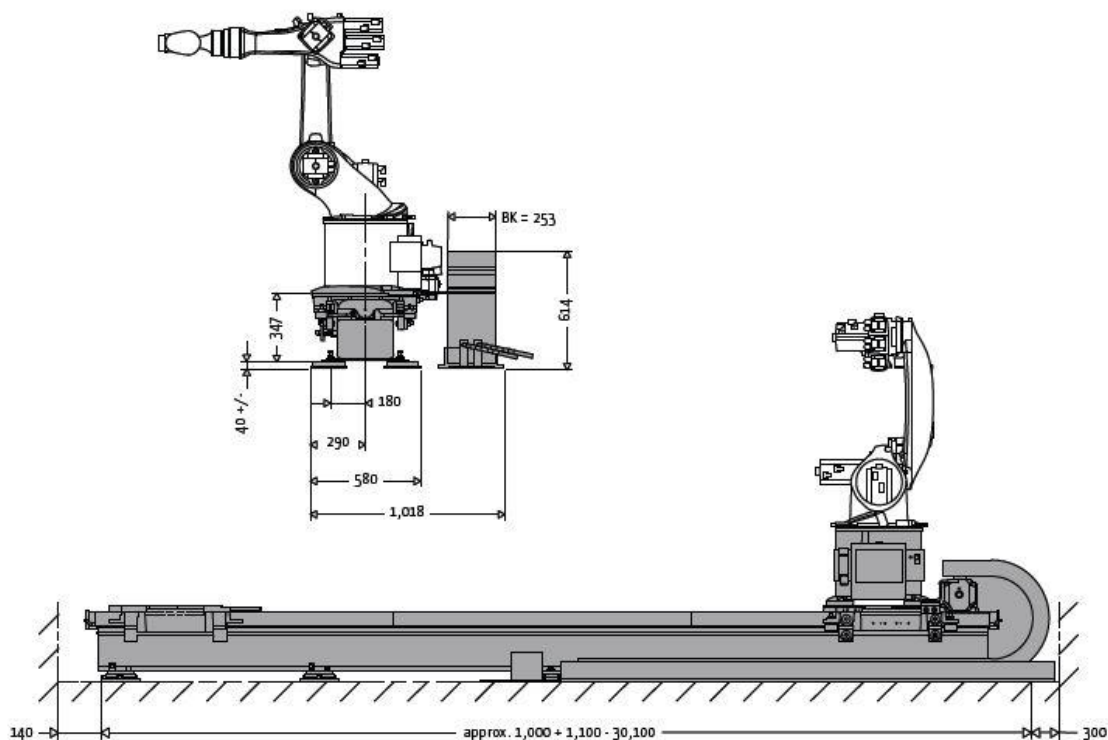
Obr. 6.1 – Lineární pojezd ABB IRBT 2005



6.1.1 Lineární pojezd Kuka KL 250 – 3

[5]

Na Obr. 6.2 je znázorněn pojezd Kuka KL 250 – 3, který se skládá ze standardního 1 metru dlouhého modulu. Délka pojezdu je od 1 metru do 30 metrů složených z jednotlivých modulů. Moduly se dodávají ve krytované verzi. Rychlost pojezdu Kuka KL 250 - 3 je 1,41 m/s. Jeho opakovatelnost polohy je 0,02 mm. Šířka pojezdu je 580 mm, výška je 347 mm.

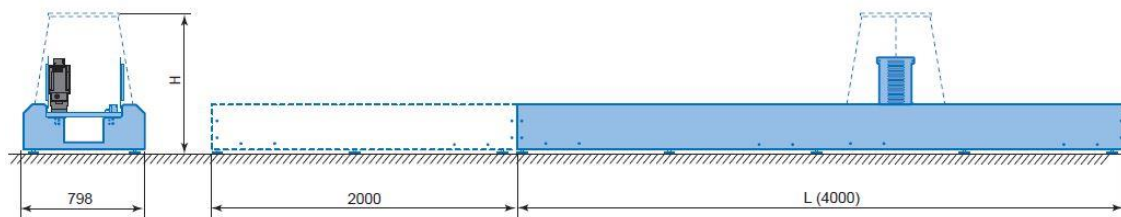


Obr. 6.2 – Lineární pojezd Kuka KL 250 – 3

6.1.2 Lineární pojezd Yaskawa TLS 1000

[6]

Na Obr. 6.3 je znázorněn pojezd Yaskawa TLS 1000, který se skládá ze standardního 1 metru dlouhého modulu. Délka pojezdu je od 2 metrů do 24 metrů složených z jednotlivých modulů. Moduly se dodávají ve krytované verzi. Rychlost pojezdu YASKAWA TLS 1000 je 1,8 m/s. Jeho opakovatelnost polohy je 0,05 mm. Šířka pojezdu je 798 mm, výška je 687 mm.



Obr. 6.3 – Lineární pojezd Yaskawa TLS 1000



V Tab. 6.1 jsou srovnány jednotlivé parametry jednotlivých pojezdů od výrobců průmyslových robotů.

	ABB IRBT 2005	KUKA KL 250 - 3	YASKAWA TLS 1000
Rozsah pojezdu [m]	2 – 21	1,1 – 30,1	2 – 24
Opakovatelnost polohy [mm]	±0,05	±0,02	±0,05
Rozměry pojezdu [mm]	450x700	347x580	687x798
Rychlost [m/s]	2	1,47	1,8
Cena za 1 m [EUR]	5 000	7 500	5 000

Tab. 6.1 - Tabulka srovnání pojezdů dle parametrů

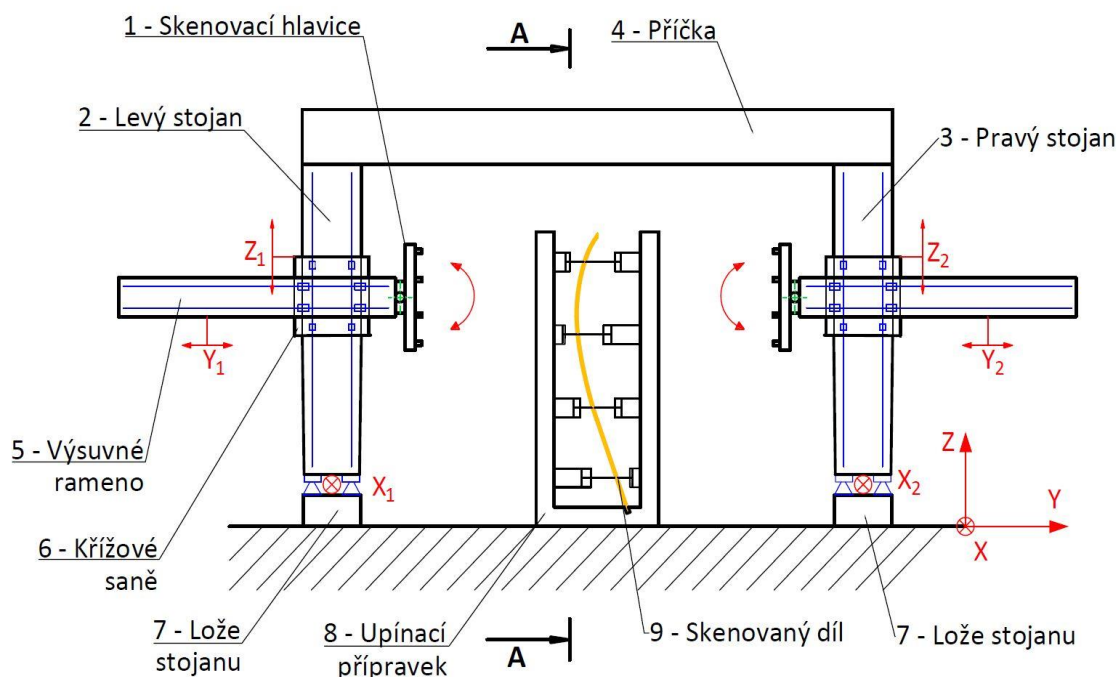


7. Návrhy řešení

V této kapitole budou popsány varianty pracoviště pro ultrazvukové skenování zakřivených ploch.

7.1 Návrh skenovacího zařízení č.1

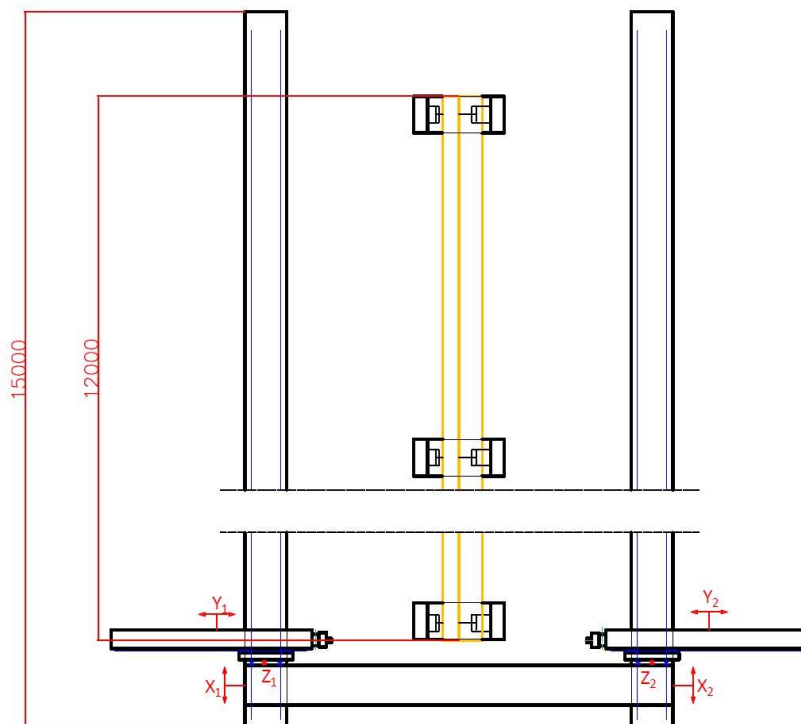
Na Obr. 7.1 je znázorněno 4-osé portálové skenovací zařízení. Toto zařízení je navrženo pro skenování průchodovou metodou. Zařízení se skládá ze skenovací hlavy (1), která se naklápí podél povrchu skenovaného dílu. Skenovací hlava je přišroubována k výsuvnému rameni (5), které se pohybuje přímočarým lineárním pohybem ve směru osy Y. Výsuvné rameno je upevněno ke křížovým saně (6). Křížové saně se pohybují přímočarým lineárním pohybem ve směru osy Z. Křížové saně jsou upevněny ke stojanu portálu. Příčka (4) spojuje levý stojan (2) a pravý stojan (3) mezi sebou pevnou vazbou. Portál se skládá z příčky a levého a pravého stojanu. Celý portál se pohybuje přímočarým lineárním pohybem ve směru osy X po loži stojanu (7). Skenovací díl (9) je připevněn v upínacím přípravku (8).



Obr. 7.1 - Návrh skenovacího zařízení Č.1

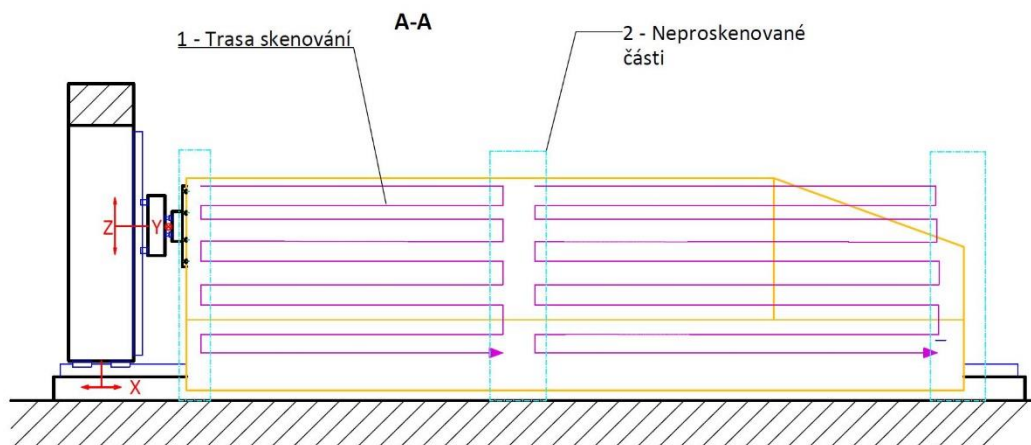


Na Obr. 7.2 je znázorněn pohled shora na navržené skenovací zařízení. Skenovaný dílec je dlouhý 12 000 mm. Pojezd v ose X je dlouhý 15 000 mm. Zde je také znázorněno uložení skenovaného dílu v upínacích přípravcích.



Obr. 7.2 - Návrh skenovacího zařízení Č.1 - pohled shora

Na Obr. 7.3 je znázorněn pohled na portálové skenovacího zařízení v řezu. Skenování je rozděleno na dvě části mezi upínacími přípravky, trasa skenování (1) se skládá z přímočarých pohybů ve 3 osách X, Y a Z. Zároveň se skenovací hlavičky naklápí podél zakřiveného povrchu skenovaného materiálu. Neproskenované části (2) jsou místa kde je skenovaný dílec upnut v upínacích přípravcích. Tyto neproskenované části se následně skenují ručně.

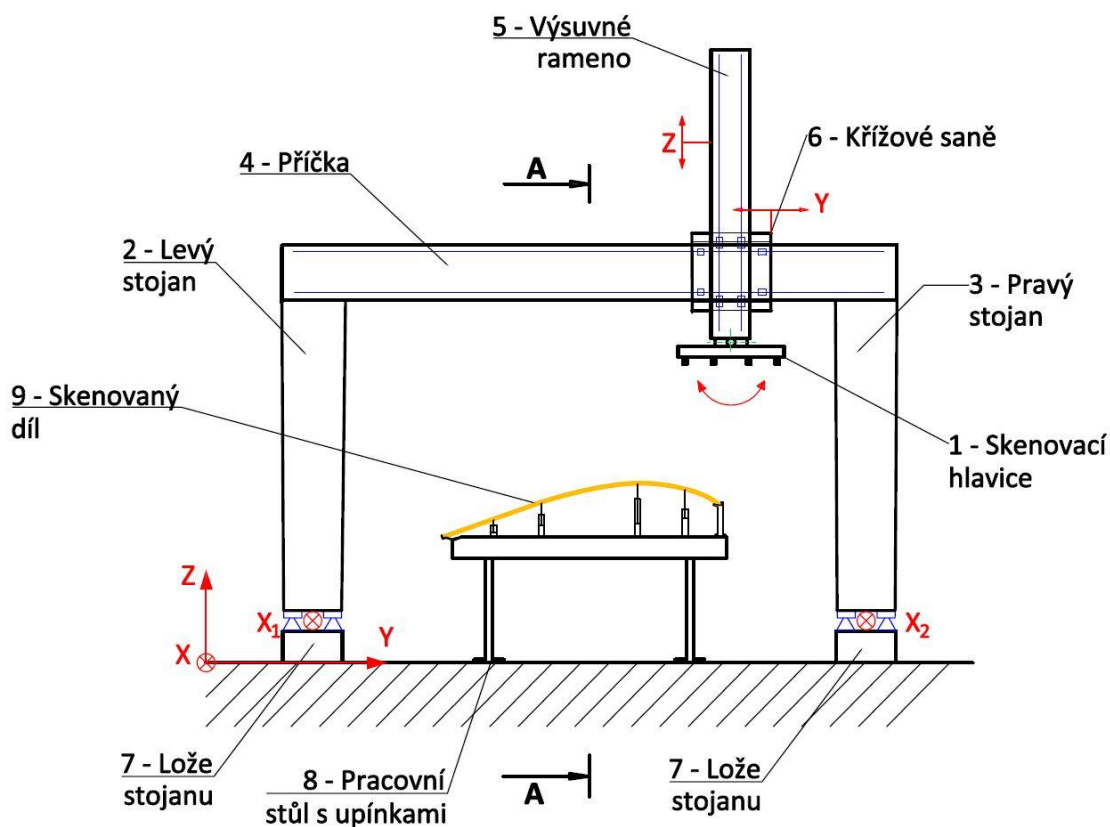


Obr. 7.3 - Návrh skenovacího zařízení Č.1 - pohled v řezu



7.2 Návrh skenovacího zařízení č.2

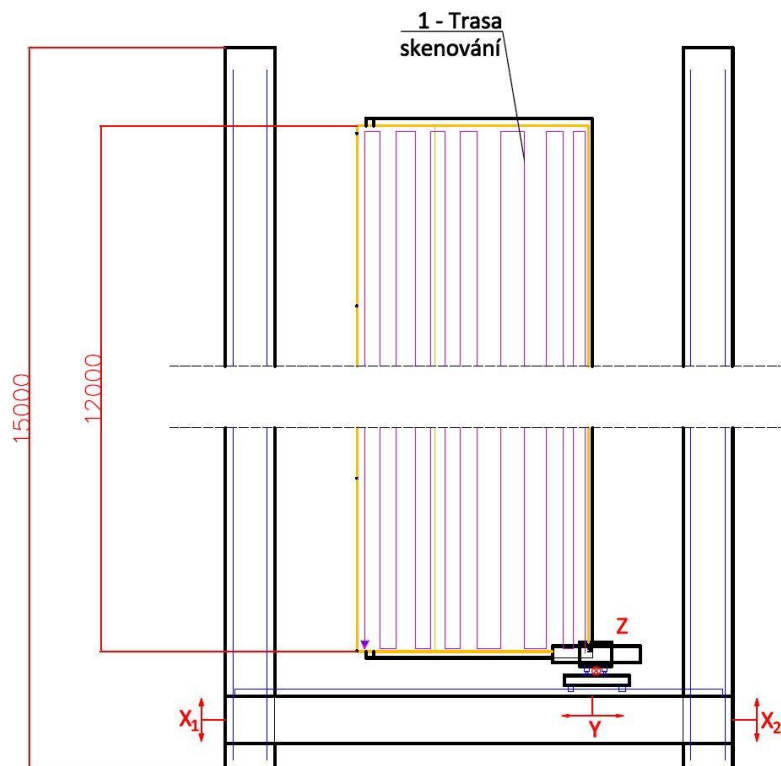
Na Obr. 7.4 je znázorněno 4-osé portálové skenovací zařízení. Toto zařízení je navrženo pro skenování odrazovou metodou. Zařízení se skládá ze skenovací hlavičky (1), která se naklápí podél zakřiveného povrchu skenovaného dílu. Skenovací hlavička je přišroubována k výsuvnému rameni (5), které se pohybuje přímočarým lineárním pohybem ve směru osy Z. Výsuvné rameno je upevněno ke křížové saně (6). Křížové saně se pohybují přímočarým lineárním pohybem ve směru osy Y. Křížové saně jsou upevněny ke stojanu portálu. Příčka (4) spojuje levý stojan (2) a pravý stojan (3) mezi sebou pevnou vazbou. Portál se skládá z příčky a levého a pravého stojanu. Celý portál se pohybuje přímočarým lineárním pohybem ve směru osy X po loži stojanu (7). Skenovací díl (9) je uložen na pracovním stole s upínkami (8).



Obr. 7.4 - Návrh skenovacího zařízení č.2

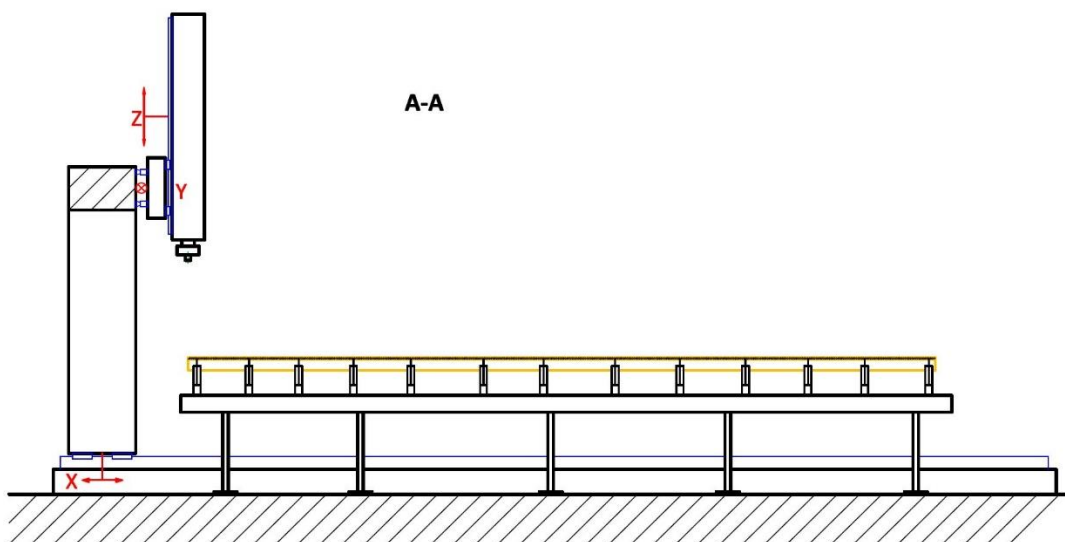


Na Obr. 7.5 je znázorněn pohled shora na navržené skenovací zařízení. Skenovaný dílec je dlouhý 12 000 mm. Pojezd v ose X je dlouhý 15 000 mm. Zde je znázorněna trasa skenování (1), díl se oskenuje bez přerušování, tím se nemusí následně ručně nic skenovat. Pracovní stůl má na délku 12 000 mm, na šířku má 1800 mm a je vysoký 1000 mm.



Obr. 7.5 - Návrh skenovacího zařízení Č.2 - pohled shora

Na Obr. 7.6 je znázorněn pohled na skenovací zařízení v podélném řezu. Je zde znázorněné rozložení upínacích prvků po délce měřeného dílce.

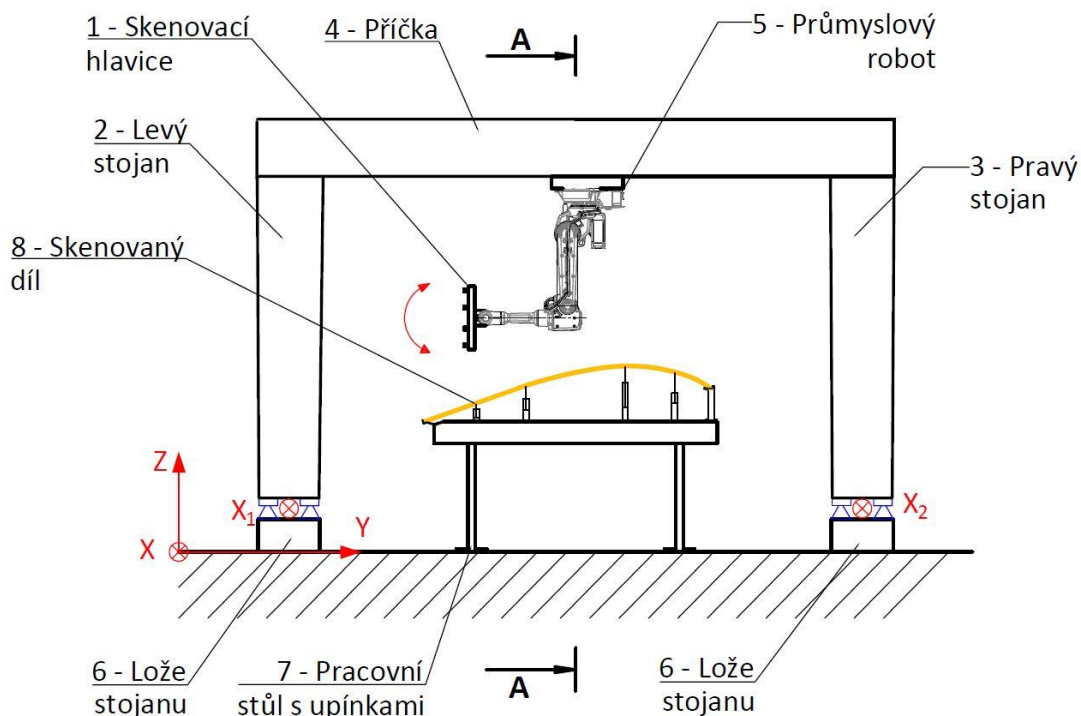


Obr. 7.6 - Návrh skenovacího zařízení Č.2 - pohled v řezu

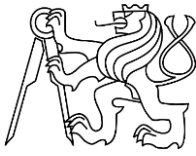


7.3 Návrh skenovacího zařízení č.3

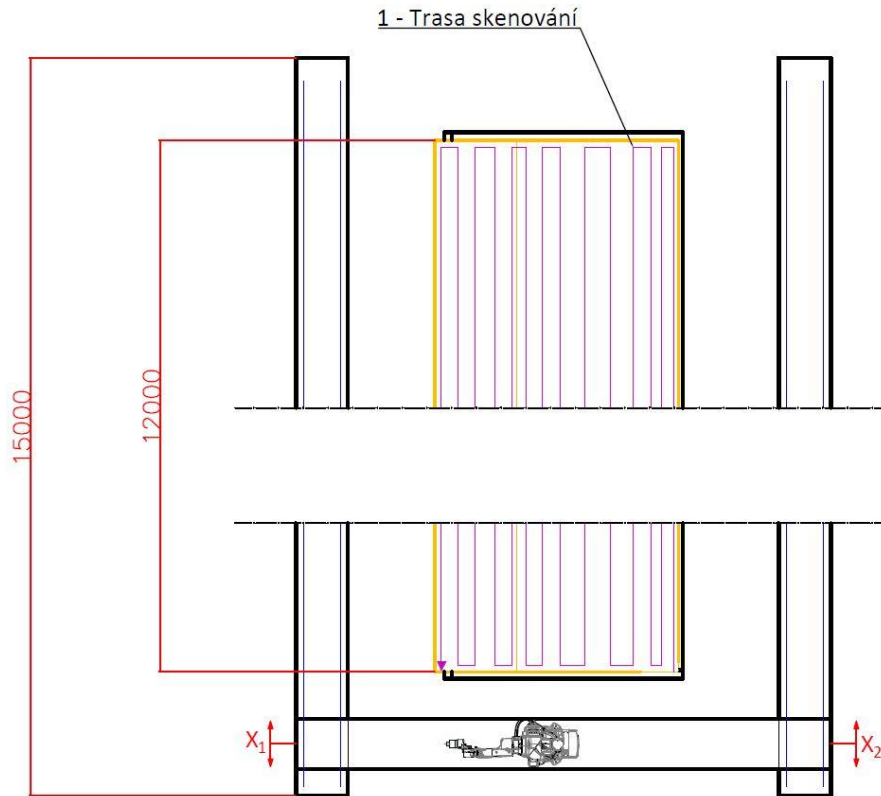
Na Obr. 7.7 je znázorněno portálové skenovací zařízení. Toto zařízení je navrženo pro odrazovou metodu skenování. Koncepce návrhu je stejná jako u návrhu č.2. Rozdílem je, že nosičem skenovací hlavy je průmyslový robot na místo výsuvného ramene. Portál se skládá z příčky (4), levého stojanu (2) a pravého stojanu (3). K příčce je přišroubovaný průmyslový robot (5). Průmyslový robot je osazen ultrazvukovou skenovací hlavicí (1). Portál se pohybuje přímočarým lineárním pohybem ve směru osy X, po loži (6). Skenovaný díl (8) je uložen na pracovním stole s upínkami (7).



Obr. 7.7 - Návrh skenovacího zařízení Č.3



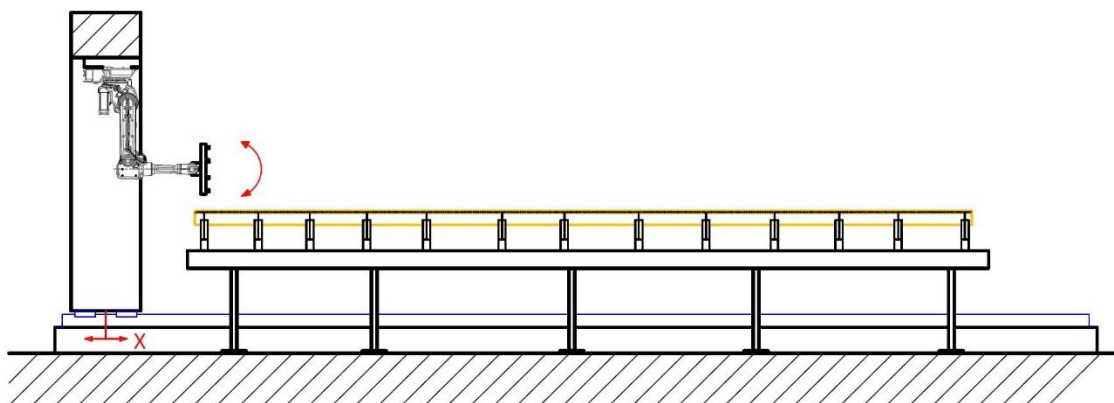
Na Obr. 7.8 je znázorněn pohled shora na navržené skenovací zařízení. Skenovaný dílec je dlouhý 12 000 mm. Pojezd v ose X je dlouhý 15 000 mm. Zde je znázorněna trasa skenování (1), díl se oskenuje bez přerušování, tím se nemusí následně ručně nic skenovat. Pracovní stůl má na délku 12 000 mm, na šířku má 1800 mm a je vysoký 1000 mm.



Obr. 7.8 - Návrh skenovacího zařízení Č.3 - pohled shora

Na Obr. 7.9 je znázorněn pohled v podélném řezu skenovacím zařízením. Je zde znázorněné rozložení upínacích prvků po délce měřeného dílce.

A-A

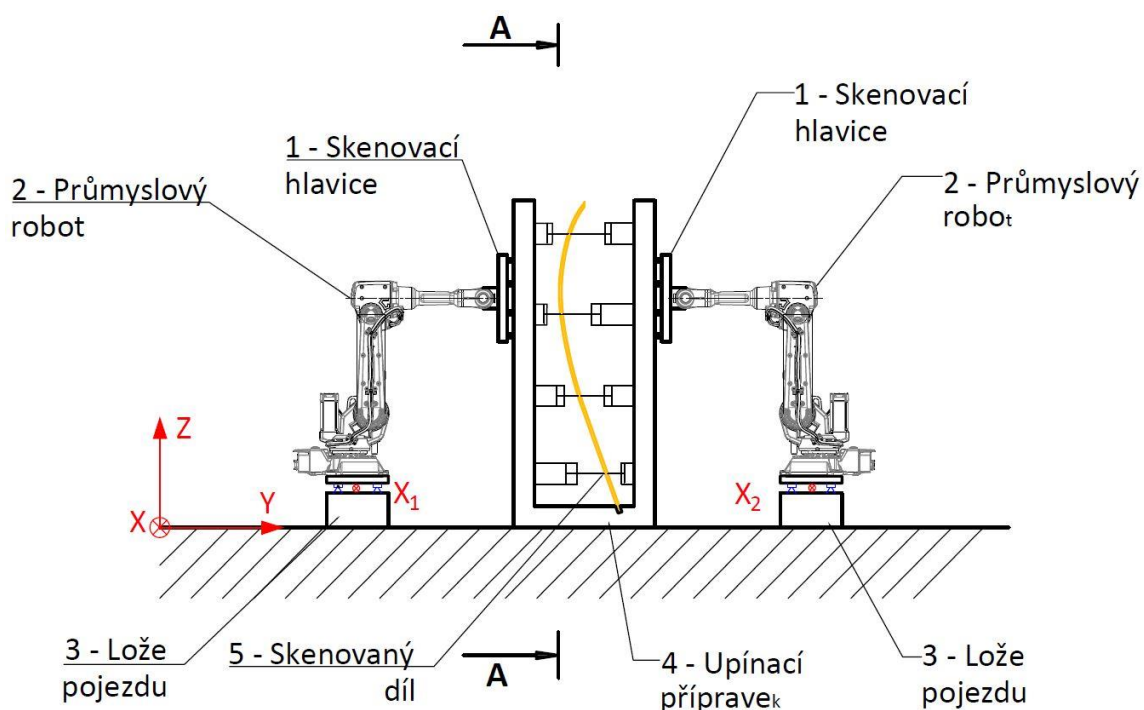


Obr. 7.9 - Návrh skenovacího zařízení Č.3 - pohled v řezu



7.4 Návrh skenovacího zařízení č.4

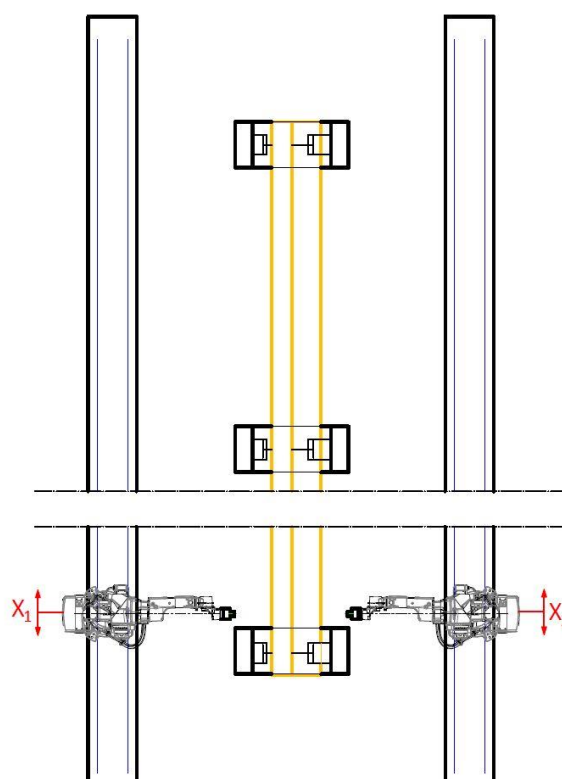
Na Obr. 7.10 je znázorněno robotické skenovací zařízení. Toto zařízení je navrženo pro průchodovou metodu skenování. Skenovací zařízení se skládá z dvou průmyslových robotů (1), který se pohybují přímočarým lineárním pohybem v ose X po loži (3). Průmyslový robot je nosičem skenovací hlavičky (1). Skenovací hlavička se natáčí podél zakřiveného povrchu skenovaného dílu (5). Skenovaný díl je ustaven v upínacím přípravku (4).



Obr. 7.10 - Návrh skenovacího zařízení č.4

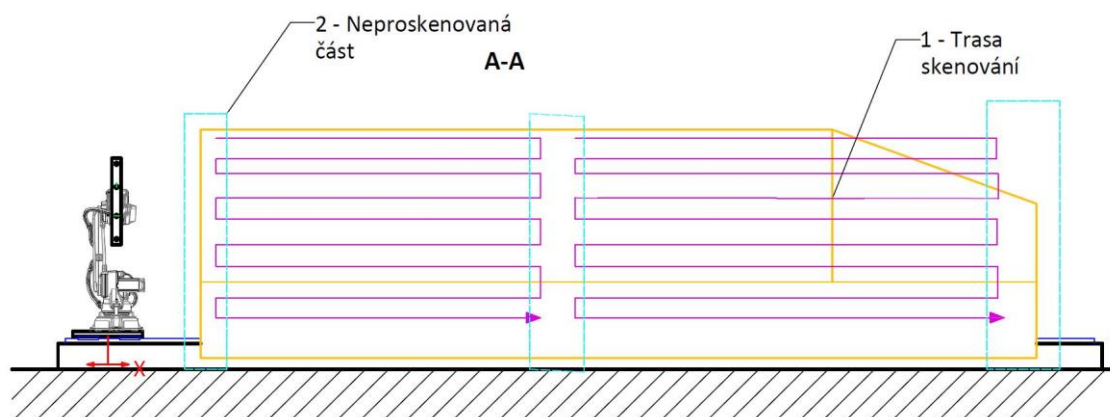


Na Obr. 7.11 je znázorněn pohled shora na skenovacího zařízení. Je zde také znázorněno rozložení upínacích prvků po délce měřeného dílce.



Obr. 7.11 - Návrh skenovacího zařízení Č.4 - pohled shora

Na Obr. 7.12 je znázorněn pohled na robotické skenovací zařízení v podélném řezu. Skenování je rozděleno na dvě části mezi upínacími přípravky, trasa skenování (1) se skládá z přímočarých pohybů ve 3 osách X, Y a Z. Zároveň se skenovací hlavice naklápí podél povrchu skenovaného materiálu. Neproskenované části (2) jsou místa, kde je skenovaný dílec upnut v upínacích přípravcích. Tyto neproskenované části se následně skenují ručně.

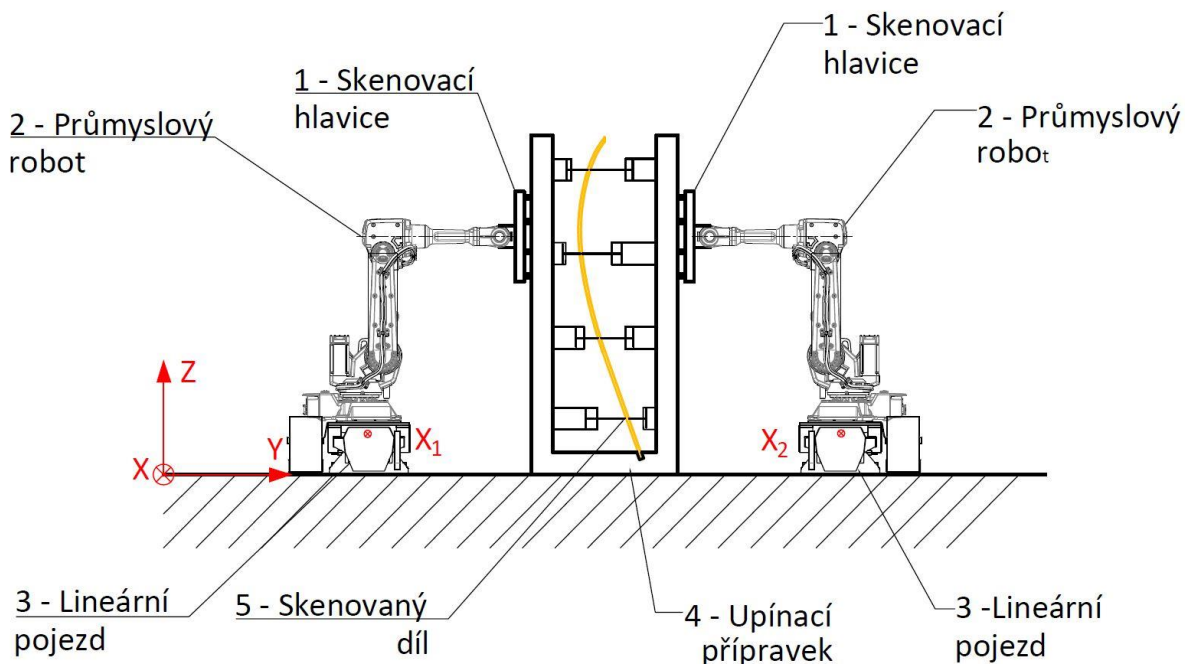


Obr. 7.12 - Návrh skenovacího zařízení Č.4 - pohled v řezu



7.5 Návrh skenovacího zařízení č.5

Na Obr. 7.13 je znázorněno robotické skenovací zařízení. Průmyslový robot (2) je nosičem skenovací hlavice (1). Ve směru osy X je pohyb průmyslového robota řešen lineárním pojezdem (3) od výrobců průmyslových robotů tímto se liší od návrhu č. 4. Skenovaný díl (5) je upevněn v upínacím přípravku (4). Trasa skenování je stejná, jako u návrhu č. 4. Tedy, kde je skenovaný díl upnut v upínacím přípravku, se musí skenovaný díl následně proskenovat ručně, viz Obr. 7.12.



Obr. 7.13 - Návrh skenovacího zařízení č.5



7.6 Výběr optimální varianty

V této kapitole je popsán výběr optimální varianty, která bude dále detailně rozpracována.

Návrh varianty č.5 je z důvodu použitých komponent velmi finančně náročný. Lineární pojezd v délce 15 metru stojí přibližně stejně jako samotný průmyslový robot. Jelikož jsou použity dva lineární pojedy a dva roboty, tak by cena tohoto zařízení byla hodně vysoká a nevyplatilo by se jí realizovat.

Z hlediska tuhosti skenovaného dílu jsou varianty č. 1 a č. 4 nevhodné pro použití. Je to z důvodu deformace skenovaného dílu, jelikož je skenovaný díl postavený na výšku. Skenovaný díl by se v tomto provedení deformoval do stran více, než by navržené upínací přípravky dokázaly zadržet. Aby nedocházelo k velkým deformacím, tak by muselo být použito více upínacích přípravků. To by způsobilo více neproskenovaných částí na skenovaném dílu a následné ruční proskenování více částí skenovaného dílu. Proto tyto dvě varianty skenovacího zařízení nejsou vhodné pro tento typ dílu, kde je délka mnohonásobně větší než tloušťka skenovaného dílu.

Návrh varianty č.3 je vhodným návrhem řešení pro tvarově složité díly, kde je více složitých zahnutých ploch, kam by se skenovací zařízení s kartézským souřadným systémem hůře nebo vůbec nedostal. Ale pro tento typ dílu je tento návrh zbytečně finančně náročný a veškeré možnosti průmyslového robota, jeho stupně volnosti, by nebyly využity.

Návrh varianty č. 2 je pro tento typ optimálním návrhem. Je levnější jak varianta č. 3. Použitím přímého odměřování se dosáhne lepší přesnosti polohování než u nepřímého odměřování. Portálový koncept zajišťuje vyšší tuhost, ale zároveň je upraven zástavbový rozměr směrem v ose Z a Y. To znamená, že se celé zařízení směřuje na výšku v ose Z a nezabírá zbytečně prostor ve směru osy Y. Díky výsuvnému ramenu, které je ve směru osy Z, se zkrátil zástavbový rozměr v ose Y.

Dále je popsáno zpracování varianty č.2 jako optimální varianty skenovacího zařízení.



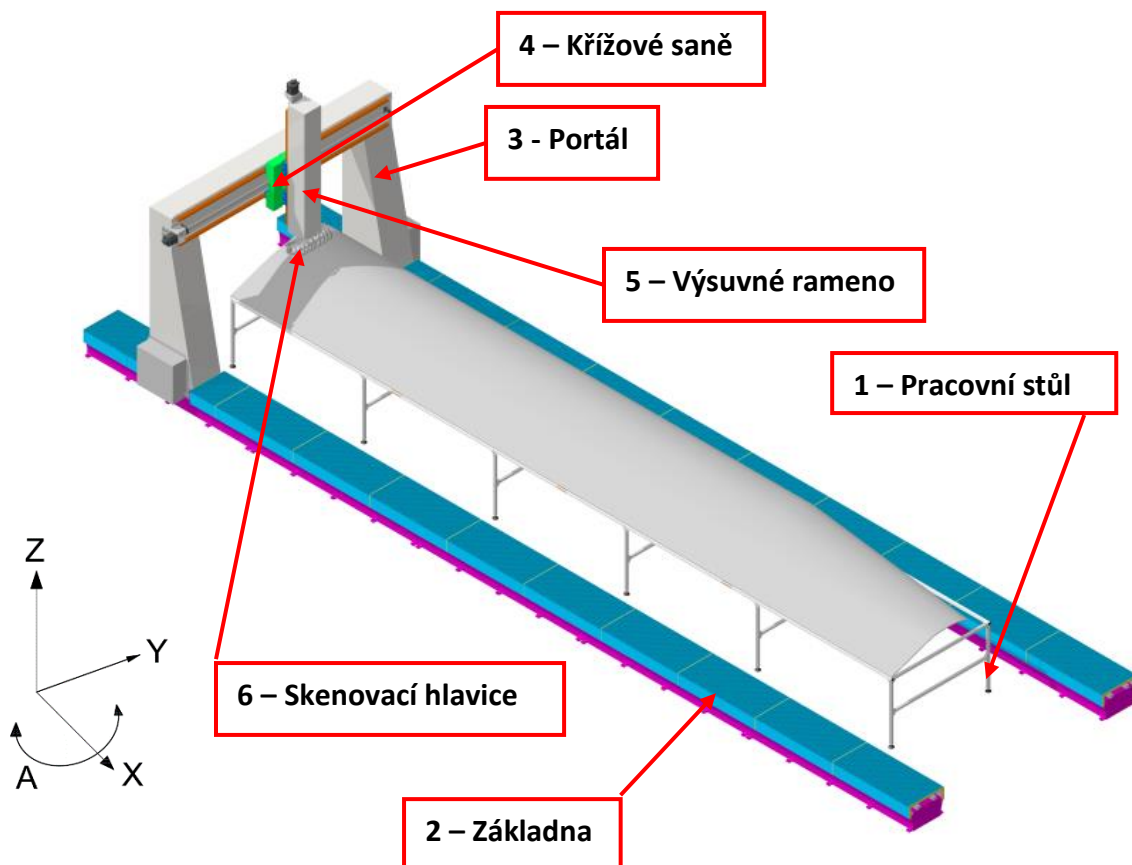
8. Konstrukční návrh výsledné varianty

Na Obr. 8.1 je zobrazen 3D model portálového skenovacího zařízení o rozměrech 4,2x4,4x15 metrů, pro automatické ultrazvukové (defektoskopické) skenování.

Skenovací zařízení se skládá z pracovního stolu (1) o rozměrech 1,1x1,8x12 metrů vyrobeného z montážních hliníkových profilů 40x40. Základny (2) se skládá z lože a krytování pojezdové osy X, směr osy X je dlouhý 15 metrů. Lože je sestaveno z odlitek s délkou 3000 mm, výškou 300 mm a šířkou 620 mm. Krytování osy X je provedeno krycími měchy od firmy Hennlich s.r.o.

Po základně v ose X se pohybuje portál (3). Portál se skládá z levého a pravého stojanu a příčky. Portál má rozměry 800x2515x4000 mm. Levý a pravý stojan je svařený z plechů a je na nich upevněno krytování pohonů osy X. Příčka je svařená z plechu a nese na sobě lineární vedení a pohon v ose Y.

V ose Y se pohybují křížové saně (4), na kterých se v ose Z pohybuje výsuvné rameno (5). Výsuvné rameno je svařeno z plechů a je nosičem skenovací hlavičky (6). Rozměry výsuvného ramena jsou 300x315x2000 mm. Skenovací hlavička se naklápí podél povrchu skenovaného dílce pomocí elektro-mechanického polohovadla.



Obr. 8.1 - 3D model - izometrický pohled

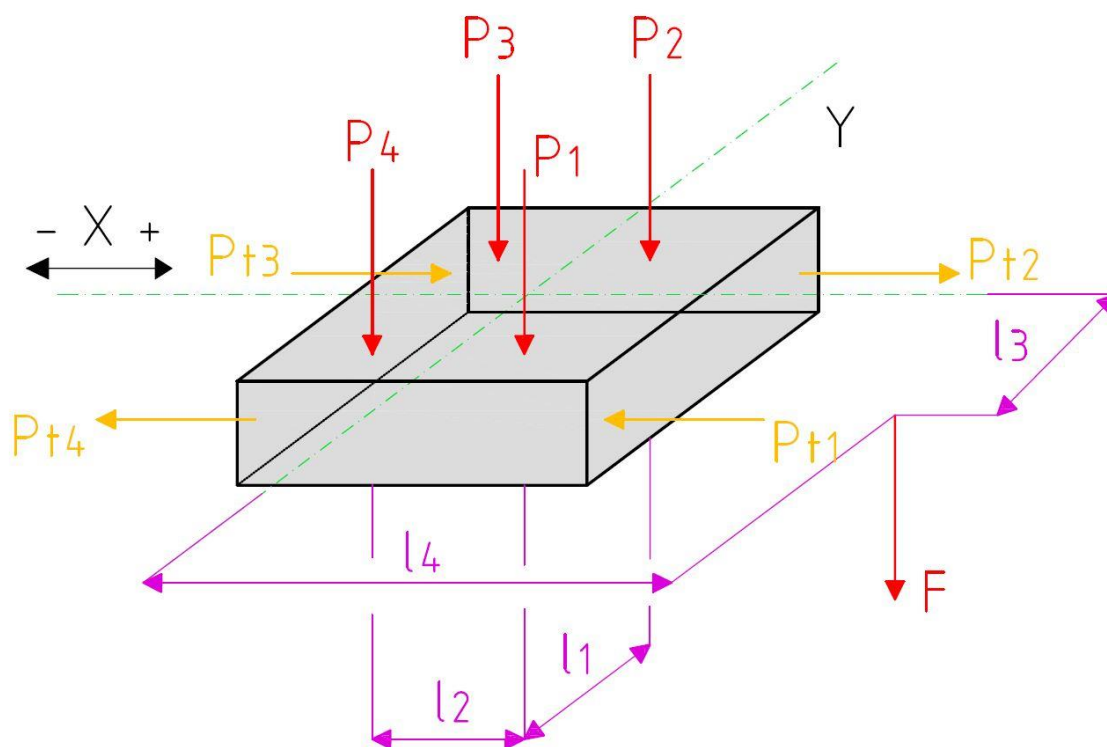


8.1 Pohybová jednotka osy X

V této kapitole je popsán výpočet a konstrukce pohybové jednotky v ose X. V této ose se řeší pohyb portálu v X-ovém směru. Portál se pohybuje po základně.

8.1.1 Výpočet pohybové jednotky

Na Obr. 8.2 je znázorněno schéma pro výpočet lineárních vedení pohybové jednotky v ose X. Zde je popsán zkrácený postup výpočtu, celý výpočet je v textové příloze na str. II. Výpočet byl proveden dle metodiky výrobců lineárního vedení.



Obr. 8.2 - Výpočtové schéma pohybové jednotky ve směru X

Zadané hodnoty jsou:

Hmotnost břemene [kg]	$m=1300$ kg
Posuvová rychlost [m/s]	$v=1$ m/s
Zdvih [m]	$h=14$ m
Dráha pro zrychlení [m]	$x_1=1,5$ m
Dráha rovnoměrného pohybu [m]	$x_2=11$ m
Dráha pro brždění [m]	$x_3=1,5$ m



Celkový počet cyklů [-] $n=50$

Vzdálenost mezi středy vozíků [m] $l_1=0,242$ m

Vzdálenost mezi středy kolejnic [m] $l_2=0,29$ m

Vzdálenost v Y-ové ose mezi středem břemena a působící silou [m]

$$l_3=0,011$$
 m

Vzdálenost v X-ové ose mezi středem břemena a působící silou [m]

$$l_4=1,7$$
 m

Výpočet ekvivalentního zátěže vozíků v rovnoměrném pohybu: [11]

$$P_{Ei} = P_i \quad [N] \quad (1)$$

$$P_{E1} = P_1 = 40\,585 \text{ N}$$

$$P_{E2} = P_2 = 40\,27 \text{ N}$$

$$P_{E3} = P_3 = -34\,481 \text{ N}$$

$$P_{E4} = P_4 = -33\,901 \text{ N}$$

Výpočet střední zátěže jednotlivých vozíku:

$$P_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1}^3 l_{a1} \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1}^3 l_{a3} \cdot x_3 + P_{E1}^3 r_{a1} \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1}^3 r_{a3} \cdot x_3}{2 \cdot h}} \quad [N] \quad (2)$$

$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1}^3 l_{a1} \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1}^3 l_{a3} \cdot x_3 + P_{E1}^3 r_{a1} \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1}^3 r_{a3} \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{43\,629^3 \cdot 1,5 + 40\,585^3 \cdot 11 + 43\,629^3 \cdot 1,5 + 43\,629^3 \cdot 1,5 + 40\,585^3 \cdot 11 + 43\,629^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$

$$= 41\,275 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{P_{E2}^3 l_{a1} \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2}^3 l_{a3} \cdot x_3 + P_{E2}^3 r_{a1} \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2}^3 r_{a3} \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{43\,322^3 \cdot 1,5 + 40\,278^3 \cdot 11 + 43\,322^3 \cdot 1,5 + 43\,322^3 \cdot 1,5 + 40\,278^3 \cdot 11 + 43\,322^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$

$$= 40\,969 \text{ N}$$



$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{P_{E3l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E3r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{37\,525^3 \cdot 1,5 + (-34\,481)^3 \cdot 11 + 37\,525^3 \cdot 1,5 + 37\,525^3 \cdot 1,5 + (-34\,481)^3 \cdot 11 + 37\,525^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$
$$= -27\,540 \text{ N}$$

$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{P_{E4l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E4r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{36\,945^3 \cdot 1,5 + (-33\,901)^3 \cdot 11 + 36\,945^3 \cdot 1,5 + 36\,945^3 \cdot 1,5 + (-33\,901)^3 \cdot 11 + 36\,945^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$
$$= -27\,056 \text{ N}$$

Nejvyšší zátěž je na vozík č.1, podle této zátěže se volí lineární vedení pohybové jednotky v ose X.

Statická a dynamická únosnost vozíků:

$$C_0 = 303\,130 \text{ N}$$

$$C = 208\,360 \text{ N}$$

Statický faktor:

$$f_S = \frac{C_0}{P_{E1l_{a1}}} = \frac{303\,130}{43\,629} = 6,95 \text{ [-]} \quad (3)$$

Faktor zatížení pro mírné rázy a vibrace při rychlostech 60 až 120 m/min

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



Nominální životnost lineárního vedení:

$$L_i = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{mi}} \right)^3 \cdot 50 \quad (4)$$

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 41\,275} \right)^3 \cdot 50 = 804 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 40\,969} \right)^3 \cdot 50 = 822 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 27\,540} \right)^3 \cdot 50 = 2\,706 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 27\,056} \right)^3 \cdot 50 = 2\,854 \text{ km}$$

Provozní životnost lineárního vedení:

$$L_{hi} = \frac{L_i \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} \quad (5)$$

$$L_{h1} = \frac{L_1 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{804 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 478,5 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \frac{L_2 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{822 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 489,3 \text{ h}$$

$$L_{h3} = \frac{L_3 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{2\,706 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 1610 \text{ h}$$

$$L_{h4} = \frac{L_4 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{2854 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 1698,8 \text{ h}$$

Lineární vedení HGW 65HC od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu 478 hodin.

Výpočet hřebenu a pastorku – zadané hodnoty: [17]

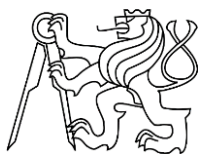
Hmotnost břemene [kg] $m=2700 \text{ kg}$

Gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Účinnost ozubeného převodu [-] $\eta=0,98$

Celkový převodový poměr [-] $i_c=1$

Normálový modul [mm] $m_n=5$



Počet zubu [-]	$z=24$
Úhel sklonu zubu [°]	$\beta=15^\circ$
Normálový úhel záběru [°]	$\alpha_n=20^\circ$
Otáčky motoru [min^{-1}]	$n=6000 \text{ min}^{-1}$

$$F=m \cdot g=2700 \cdot 9,81=26\,487 \text{ N}$$

Výpočet čelního ozubeného kola se šikmými zuby:

$$h_a = m_n = 5 \text{ mm} \quad (6)$$

$$h_f = 1,25 \cdot m_n = 1,25 \cdot 5 = 6,25 \text{ mm} \quad (7)$$

$$d = \frac{m_n \cdot z}{\cos(\beta)} = \frac{5 \cdot 24}{\cos(15)} = 124,2 \text{ mm} \quad (8)$$

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = 124,2 + 2 \cdot 5 = 134,2 \text{ mm} \quad (9)$$

$$d_f = d - 2 \cdot h_f = 124,2 - 2 \cdot 6,25 = 111,73 \text{ mm} \quad (10)$$

$$d_b = d \cdot \cos(\alpha) = 124,2 \cdot \cos(20) = 116,7 \text{ mm} \quad (11)$$

Výpočet elektromotoru:

$$P = \frac{F \cdot v}{4000} = \frac{26\,487 \cdot 1}{4000} = 6,6 \text{ W} \quad (12)$$

$$P_m = \frac{P}{\eta} = \frac{6,6}{0,98} = 6,75 \text{ W} \quad (13)$$

$$M_k = \frac{2000 \cdot F}{4 \cdot d} = \frac{2000 \cdot 26\,487}{4 \cdot 124,2} = 411,3 \text{ Nm} \quad (14)$$

$$i_{\text{přev}} = 8$$

$$M_m = \frac{M_k}{i_{\text{přev}}} = \frac{411,3}{8} = 51,4 \text{ Nm} \quad (15)$$

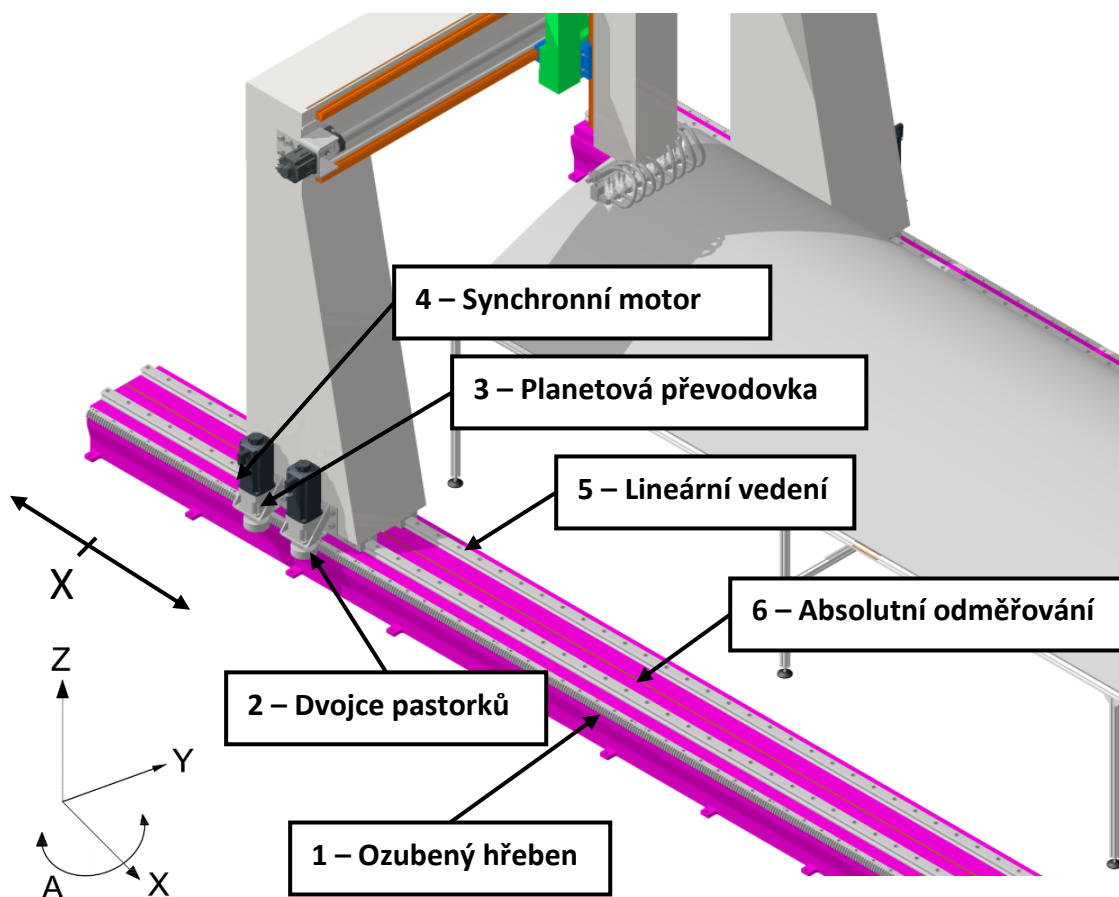
$$P_p = \frac{P_m}{i_{\text{přev}}} = \frac{6,75}{8} = 0,845 \text{ W} \quad (16)$$

Z výpočtu vyšel pastorek F05L24B45 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. Dále podle pastorku byl zvolen hřeben 0504R100C10 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. K pohybu pastorku byl zvolen synchronní motor 1FK7086-4CF1-1CH2 od firmy SIEMENS s.r.o. a k tomu vybrána planetová převodovka AF1401-P0401500202 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o.



8.1.2 Konstrukce pohybové jednotky

Na Obr. 8.3 je zobrazená pohybová jednotka osy X. Pohybová jednotka se skládá z ozubeného hřebenu (1), dvou dvojic pastorků (2) z důvodu předepnutí ozubeného převodu, planetové převodovky (3), synchronního motoru (4), lineárního vedení (5), a absolutního magnetického odměřování (6).



Obr. 8.3 - Pohybová jednotka osy X

Dvojice pastorků F05L24B45 je od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. Planetové převodovky AF1401-P0401500202 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. Synchronní motor 1FK7086-4CF71-1CH2 od firmy SIEMENS s.r.o.

Pohybová osa X je řízena mezi stojany typem řízení „Gantry“, tzn. každý stojan má své vlastní odměřování, proudovou, rychlostní a polohovou smyčku.

Pastorky na jednom stojanu jsou řízeny mezi sebou typem „Master and slave“, tzn. jeden pastorek má odměřování a polohovou vazbu, proudovou a rychlostní vazbu má každý pastorek zvlášť. V tomto typu řízení je i předepínací část.



V Tab. 8.1 jsou parametry ozubeného hřebenu 0504R100C10 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. Hřeben má šikmé zuby s modulem 5 mm, počet zubů na jednom modulu hřebenu je 60 zubů. [13]

Modul	P_t	L1	L2	Počet zubů	B
5	16,66669	1000	17,4	60	49
H	h_0	f	a	l	Počet otvorů
39	34	3	62,5	125	8
h	d_1	d_2	t	a_1	l_1
12	14	20	13	37,5	925
d_3	f_p	F_p	Označení		
11,7	0,005	0,020	0504R100C10		

Tab. 8.1 - Parametry ozubeného hřebenu [13]

V Tab. 8.2 jsou parametry ozubeného pastorku F05L24B45 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. Pastorek má šikmé zuby s modulem 5 mm, počet zubů na pastorku je 24 zubů.

Modul	Počet zubů		Jednotkové posunutí		d_a	d_w	d_{1H6}	d_2
5	24		0		127,3	127,3	45	68
B_1	L_1	w_{JS9}	H	L	Pastorek	Svěrný kroužek		
50	85	14	48,8	400	F05L24B45	SSD-68		

Tab. 8.2 - Parametry pastorku [13]



Magnetické absolutní odměřování RLS LA11 od firmy HIWIN s.r.o. s přesností systému $\pm 40 \mu\text{m/m}$. Maximální rozlišení je $0,244 \mu\text{m}$ a maximální rychlost, kterou dokáže odměřování stále pracovat je 7 m/s . V Tab. 8.3 jsou parametry magnetického absolutního odměřování. [12]

Označení	Roztečná stupnice [mm]	Přesnost systému [$\mu\text{m/m}$]	Max. rozlišení [μm]	Max. délka stupnice [mm]	Max. rychlost [m/s]	Výstupní signály	Délka kabelu [m]	Napájení
LA11	2	± 40	0,244	16,3	7	SSI, SPI, BiSS	1	A 5V B 8-30V

Tab. 8.3 - Parametry absolutního magnetického odměřování [12]

V Tab. 8.4 jsou parametry lineárního vedení HGW 65HC od firmy HIWIN s.r.o. Dynamická únosnost lineárního vedení je $208\,360 \text{ N}$ a statická únosnost je $303\,130 \text{ N}$. Lineární vedení HGW má ochranu proti prachu, je třídy přesnosti C. [12]

Řada/rozměr	Montážní rozměry [mm]			Rozměry vozíku [mm]			
	H	H ₁	N	W	B		
HGW65HC	90	15,0	53,5	170	142		
Rozměry vozíku [mm]							
B ₁	C	L ₁	L	K ₁	K ₂	M	G
14,0	110	203,6	259,6	52,8	14,0	M16	12,9
Rozměry vozíku [mm]					Únosnosti [N]		Hmotnost [kg]
T	T ₁	T ₂	H ₂	H ₃	C _{dyn}	C ₀	
25	37,5	23,0	15,0	15,0	208 360	303 130	12,89

Tab. 8.4 - Parametry lineárního vedení [12]



V Tab. 8.5 jsou popsány parametry synchronního motoru 1FK7086-4CF71-1CH2 od firmy SIEMENS s.r.o. Maximální točivý moment synchronního motoru je 79,3 Nm a maximální otáčky jsou 6000 1/min. [16]

Typ	Jmenovitý točivý moment [Nm]	Maximální točivý moment [Nm]	Maximální otáčky [1/min]	Brzdný moment [Nm]	Jmenovité napětí [A]	Krytí
1FK7086-4CF71-1CH2	6,5	79,3	6000	22	5,7	IP65/IP67

Tab. 8.5 - Parametry synchronního motoru

[16]

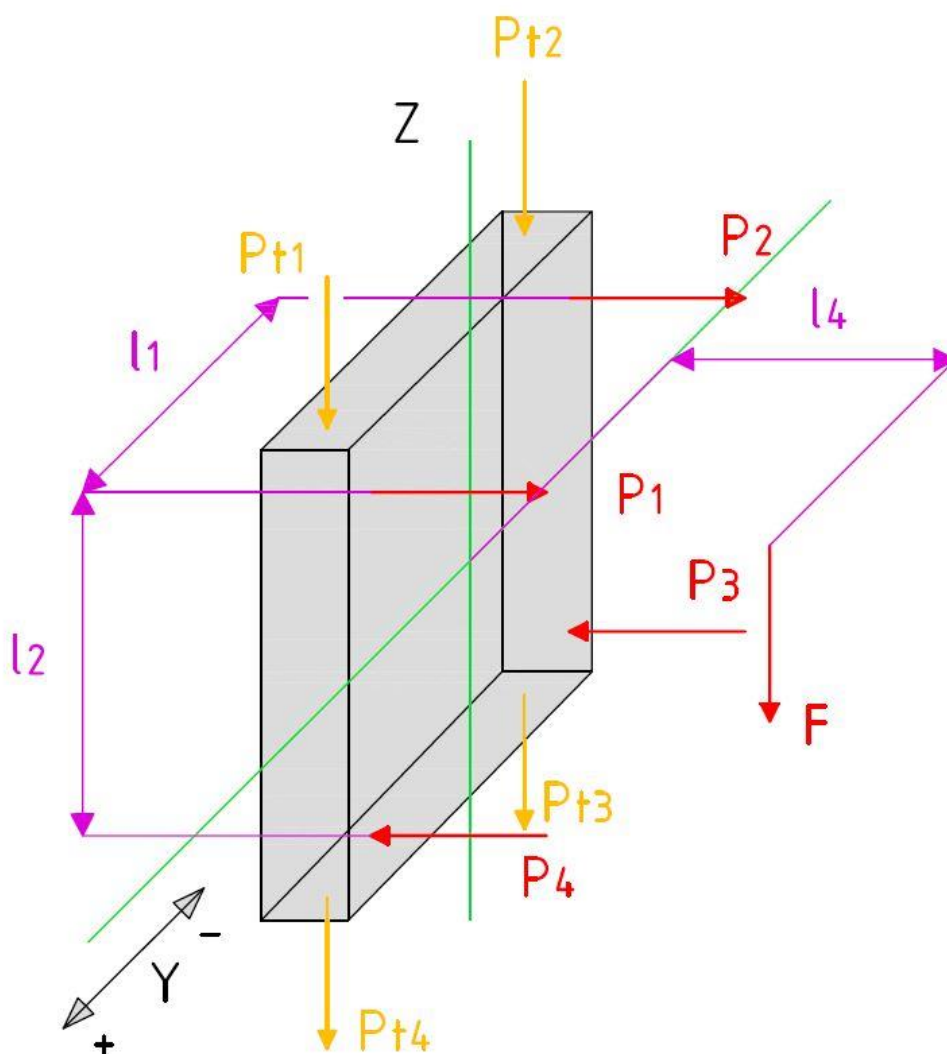


8.2 Pohybová jednotka osy Y

V této kapitole je popsán výpočet pohybové a konstrukce pohybové jednotky v ose Y. Jedná se o křížové saně, které se pohybují po příčce v ose Y.

8.2.1 Výpočet pohybové jednotky

Na Obr. 8.4 je znázorněno schéma pro výpočet lineárních vedení pohybové jednotky v ose Y. Zde je popsán zkrácený postup výpočtu, celý výpočet je v textové příloze na str. XIV.



Obr. 8.4 - Výpočtové schéma pohybové jednotky ve směru Y



Zadané hodnoty jsou:

$m_2=610$ kg	Hmotnost břemene [kg]
$v=1$ m/s	Posuvová rychlost [m/s]
$h=3,5$ m	Zdvih [m]
$x_1=0,5$ m	Dráha pro zrychlení [m]
$x_2=2,5$ m	Dráha rovnoměrného pohybu [m]
$x_3=0,5$ m	Dráha pro brzdění [m]
$g=9,81$ m.s ⁻²	Gravitační zrychlení [m.s ⁻²]
$n=18$	Celkový počet cyklů [-]
$l_1=0,4$ m	Vzdálenost mezi středy vozíky [m]
$l_2=0,4$ m	Vzdálenost mezi středy kolejnic [m]
$l_3=0$ m	Vzdálenost v Y-ose mezi osou pohybového šroubu a působící silou [m]
$l_4=0,055$ m	Vzdálenost v X-ové ose mezi středem břemenu a působící silou [m]

Výpočet ekvivalentního zátěže v rovnoměrném pohybu: [11]

$$P_{Ei} = P_i \quad [N] \quad (17)$$

$$P_{E1} = P_1 = 263,3 \text{ N}$$

$$P_{E2} = P_2 = 263,3 \text{ N}$$

$$P_{E3} = P_3 = 263,3 \text{ N}$$

$$P_{E4} = P_4 = 263,3 \text{ N}$$



Výpočet střední zátěže jednotlivých vozíků:

$$P_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E1r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}} \quad [N] \quad (19)$$

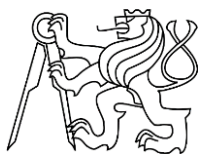
$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E1r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1675^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{P_{E2l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E2r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5 + 1675^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{P_{E3l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E3r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1675^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{P_{E4l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E4r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5 + 1675 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

Nejvyšší zátěž je na vozík č.1, podlé této zátěže se volí lineární vedení pohybové jednotky v ose Y.



Statická a dynamická únosnost vozíků:

$$C_0 = 76\,000 \text{ N}$$

$$C = 32\,750 \text{ N}$$

Statický faktor:

$$f_S = \frac{C_0}{P_{E^1 d_{a1}}} = \frac{76\,000}{1843} = 45,4 [-] \quad (20)$$

Faktor zatížení pro silné rázy a vibrace při rychlostech vyšších 120 m/min

$$f_w = 3 [-]$$

Nominální životnost lineárního vedení:

$$L_i = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{mi}} \right)^3 \cdot 50 \quad (21)$$

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,6} \right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,} \right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,} \right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,} \right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

Provozní životnost lineárního vedení:

$$L_{hi} = \frac{L_i \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} \quad (22)$$

$$L_{h1} = \frac{L_1 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 5\,447,5 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \frac{L_2 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 5\,447,5 \text{ h}$$

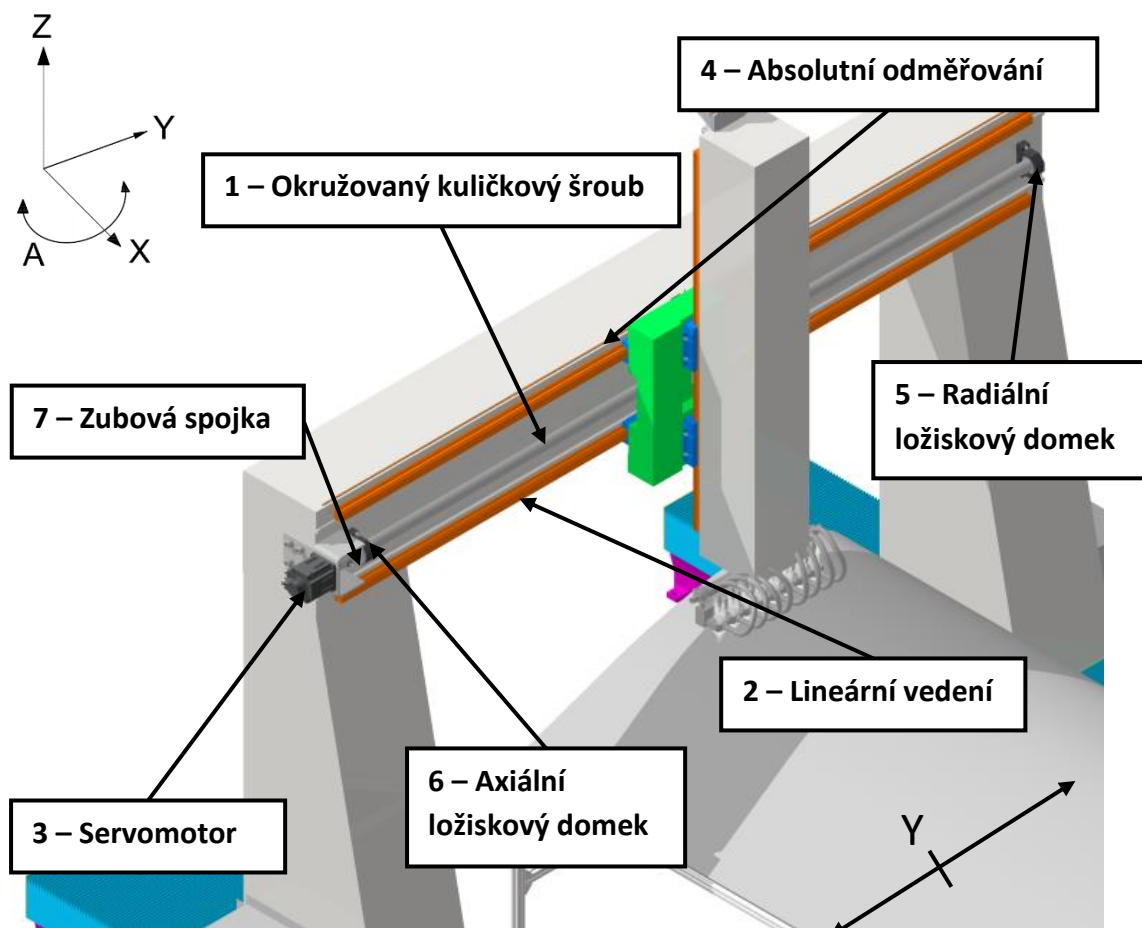
$$L_{h3} = \frac{L_3 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 5\,447,5 \text{ h}$$

$$L_{h4} = \frac{L_4 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$



8.2.2 Konstrukce pohybové jednotky

Na Obr. 8.5 je znázorněna pohybová jednotka osy Y. Pohybová jednotka se skládá z okružovaného kuličkového šroubu (1), lineárního vedení (2), servomotoru (3) a absolutního magnetického odměřování (4). Okružovaný kuličkový šroub je uložen v radiálním ložiskovém domku (5) a v axiálním ložiskovém domku (6). Servomotor a okružovaný kuličkový šroub jsou spojeny zubovou spojkou (7).



Obr. 8.5 - Pohybová jednotka osy Y



V Tab. 8.6 jsou parametry lineárního vedení HGW 55HC od firmy HIWIN s.r.o. Dynamická únosnost lineárního vedení je 139 350 N a statická únosnost je 196 200 N. Lineární vedení HGW má ochranu proti prachu, je třídy přesnosti C. [12]

Řada/rozměr	Montážní rozměry [mm]			Rozměry vozíku [mm]			
	H	H ₁	N	W	B		
HGW55HC	70	13,0	43,5	140	116		
Rozměry vozíku [mm]							
B ₁	C	L ₁	L	K ₁	K ₂	M	G
12,0	95	155,8	204,8	36,4	11,0	M14	12,9
Rozměry vozíku [mm]					Únosnosti [N]		Hmotnost [kg]
T	T ₁	T ₂	H ₂	H ₃	C _{dyn}	C ₀	
17,5	26,5	17	12,0	19,0	139 350	196 200	5,96

Tab. 8.6 - Parametry lineárního vedení

[12]

V Tab. 8.7 jsou parametry okružovaného kuličkového šroubu DDB5010-R-4EF s dvojitou předepnutou přírubovou maticí od firmy HIWIN s.r.o. Dynamická únosnost kuličkového šroubu je 52 800 N a statický únosnost je 106 800 N. Kuličkový šroub je uložen v ložiskových domcích SFA-40 s radiálním a axiálním uložením a v ložiskovém domku SLA-40 s axiálním uložením. [12]

Označení	ds	P	D	D ₁	D ₂	D ₃
DDB5010-R-4EF	50	10	75	110	93	11,0
Uspořádání otvorů	L	L ₁	L ₂	L ₃	S	B
2	164	16	16	8	M8x1	85
dk	C _{dyn} [N]		C ₀ [N]		Hmotnost [kg]	
45,8	52 800		106 800		2,5	

Tab. 8.7 - Parametry kuličkového šroubu

[12]



V Tab. 8.8 jsou znázorněny parametry servopohonu FRMM1K2B513C od firmy HIWIN s.r.o. Servopohon je vybaven frekvenčním měničem. Jmenovitý výkon servopohonu je 1 kW, maximální otáčky jsou 3000 ot/min. Maximální moment je 14,3 Nm. [12]

Označení		Brzda	L [mm]	Hřídel s perem		P [W]	U [V AC]
FRMM1K2B513C		ano	172,5	ano		1000	220 1f
T _c [Nm]	T _p [Nm]	I _c [A]	I _p [A]	n _c [1/min]	n _p [1/min]	Hmotnost [kg]	
4,77	14,3	5,1	15,3	2000	3000	6,2	

Tab. 8.8 - Parametry servopohonu [12]

Magnetické absolutní odměřování RLS LA11 od firmy HIWIN s.r.o. s přesností systému $\pm 40 \mu\text{m/m}$. Maximální rozlišení je $0,244 \mu\text{m}$ a maximální rychlost, kterou dokáže odměřování stále pracovat je 7 m/s. V Tab. 8.9 jsou parametry magnetického absolutního odměřování. [12]

Označení	Roztečná stupnice [mm]	Přesnost systému [$\mu\text{m/m}$]	Max. rozlišení [μm]	Max. délka stupnice [mm]	Max. rychlost [m/s]	Výstupní signály	Délka kabelu [m]	Napájení
LA11	2	± 40	0,244	16.3	7	SSI, SPI, BiSS	1	A 5V B 8-30V

Tab. 8.9 - Parametry absolutního magnetického odměřování [12]

V Tab. 8.10 jsou parametry zubové spojky ROTEX 24 Spider 98 Sh-A od firmy KTR s.r.o. Jmenovitý točivý moment spojky je 60 Nm.

Velikost	T _{KN} [Nm]	d _{max}	D _H	D _K	L	I ₁ , I ₂
24	60	32	55	57,5	54	18
E	b	s	t	e	M	T _A [Nm]
18	14	2	11	20	M6	10

Tab. 8.10 - Parametry zubové spojky [15]

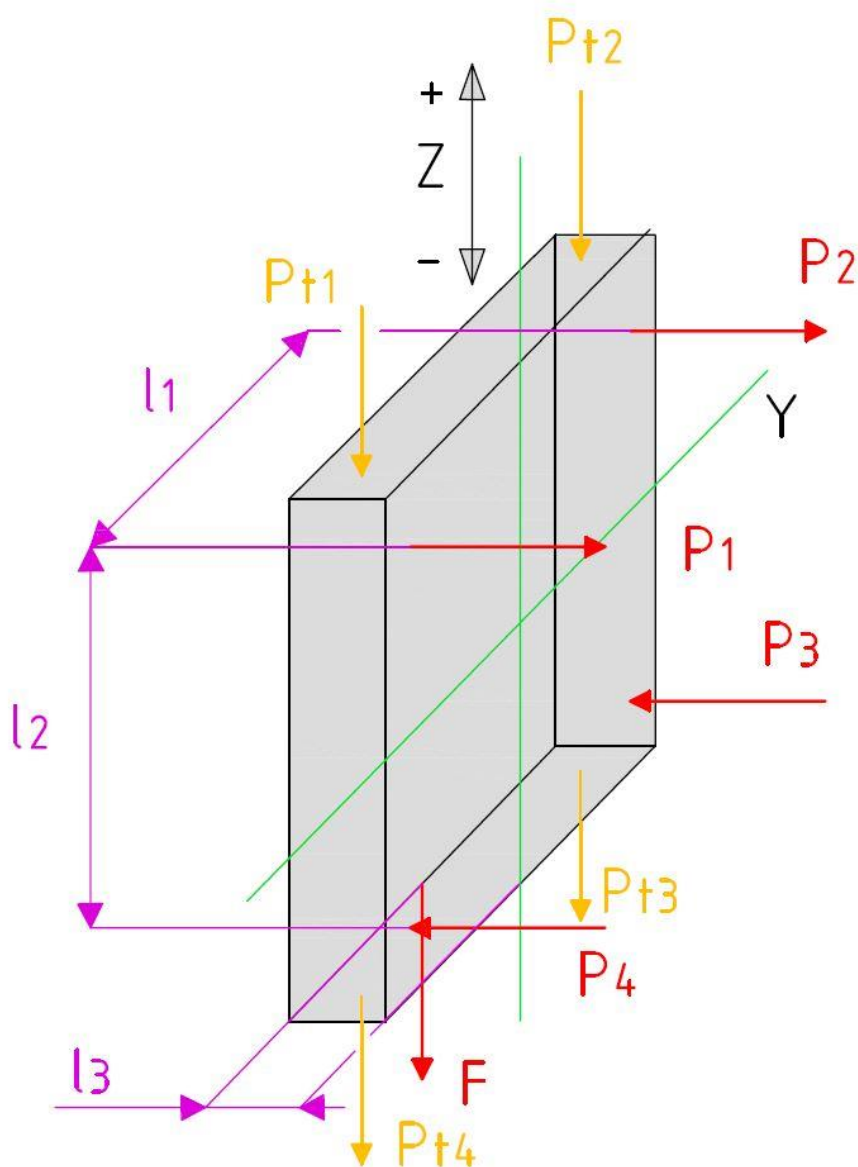


8.3 Pohybová jednotka osy Z

V této kapitole je popsán výpočet a konstrukce pohybové jednotky v ose Z.

8.3.1 Výpočet pohybové jednotky

Na Obr. 8.6 je znázorněno schéma pro výpočet lineárních vedení pohybové jednotky v ose Z. Zde je popsán zkrácený postup výpočtu, celý výpočet je na str. XXIV v textové příloze.



Obr. 8.6 - Výpočtové schéma pohybové jednotky ve směru Z



Zadané hodnoty jsou:

$m=310$ kg	Hmotnost břemene [kg]
$v=1$ m.s ⁻¹	Posuvová rychlost [m/s]
$h=1,8$ m	Zdvih [m]
$x_1=0,5$ m	Dráha pro zrychlení [m]
$x_2=0,8$ m	Dráha rovnoměrného pohybu [m]
$x_3=0,5$ m	Dráha pro brždění [m]
$g=9,81$ m.s ⁻²	Gravitační zrychlení [m.s ⁻²]
$n=8$	Celkový počet cyklů [-]
$l_1=0,4$ m	Vzdálenost mezi středy vozíky [m]
$l_2=0,217$ m	Vzdálenost mezi středy kolejnic [m]
$l_3=0,12$ m	Vzdálenost v Y-ové ose mezi osou pohybového šroubu a působící silou [m]
$l_4=0,085$ m	Vzdálenost v X-ové ose mezi středem břemenu a působící silou [m]

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro rovnoměrný pohyb: [11]

$$P_i = \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} \quad [N] \quad (31)$$

$$P_1 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$

$$P_3 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$

$$P_4 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$



Výpočet střední zátěže jednotlivých vozíků:

$$P_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{Eiu_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{Ei}^3 \cdot x_2 + P_{Eiu_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{Eida_1}^3 \cdot x_1 + P_{Ei}^3 \cdot x_2 + P_{Eida_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}} \quad [N] \quad (32)$$

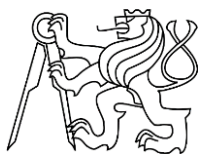
$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E1da_1}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1da_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{P_{E2u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E2da_1}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2da_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{P_{E3u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E3da_1}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3da_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{P_{E4u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E4da_1}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4da_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

Nejvyšší zátěž je na vozík č.1, podlé této zátěže se volí lineární vedení pohybové jednotky v ose Z.



Statická a dynamická únosnost vozíků:

$$C_0 = 76\,000 \text{ N}$$

$$C = 32\,750 \text{ N}$$

Statický faktor:

$$f_S = \frac{C_0}{P_{E1d_{a1}}} = \frac{76\,000}{860} = 88,4 [-] \quad (33)$$

Faktor zatížení pro silné rázy a vibrace při rychlostech vyšších 120 m/min

$$f_w = 3 [-]$$

Nominální životnost lineárního vedení:

$$L_i = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{mi}} \right)^3 \cdot 50 \quad (34)$$

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

Provozní životnost lineárního vedení:

$$L_{hi} = \frac{L_i \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \quad (35)$$

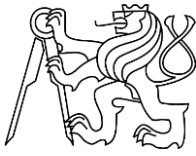
$$L_{h1} = \frac{L_1 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \frac{L_2 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

$$L_{h3} = \frac{L_3 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

$$L_{h4} = \frac{L_4 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

Lineární vedení HGW55HC od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu 120 050 hodin.



Určení vzdáleností pohybové matice: [12]

$l_k=1216$ m Nepodepřená délka hřídele [m]

$l_d=1800$ m Vzdálenost mezi ložisky [m]

Výpočet kontrolní vzpěrné tuhosti:

$$F_{max} = m_2 \cdot a_1 = 610 \cdot 2 = 1220 \text{ N} \quad (36)$$

$$F_k = 2 \cdot F_{max} = 2 \cdot 1220 = 2440 \text{ N} \quad (37)$$

Koeficient závislosti na uložení pohybového šroubu:

$$k_k=1,03 \text{ [-]}$$

$$d_k = \sqrt[4]{\frac{F_k \cdot l_k^2}{k_k \cdot 10^5}} = \sqrt[4]{\frac{2440 \cdot 3200^2}{1,03 \cdot 10^5}} = 22,2 \text{ mm} \quad (38)$$

Průměr hřídele pohybového šroubu dle katalogu:

$$d_{kk}=45,8 \text{ mm}$$

Jmenovitý průměr hřídele pohybového šroubu:

$$d_j=50 \text{ mm}$$

Stoupání pohybového šroubu: $P=10$ mm

Účinnost pohybového šroubu: $\eta=0,88$

Dynamická únosnost pohybového šroubu:

$$C_{dyn} 52\,800 \text{ N}$$

Kontrolní životnost pohybového šroubu:

$$n_m = \frac{n_{max} \cdot t_c}{1000} = \frac{1518 \cdot 1,8}{1000} = 21,9 \text{ min}^{-1} \quad (39)$$

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_{max}^3 \cdot t_c}{1000}} = \sqrt[3]{\frac{620^3 \cdot 1,8}{1000}} = 150,8 \text{ N} \quad (40)$$

$$L = \sqrt[3]{\frac{C_{dyn}}{F_m}} = \sqrt[3]{\frac{52800}{150,8}} = 7 \quad (41)$$

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n_m \cdot 60} = \frac{7 \cdot 10^6}{21,9 \cdot 60} = 14\,682 \text{ hod} \quad (42)$$

Výpočet hnacího kroutícího momentu:

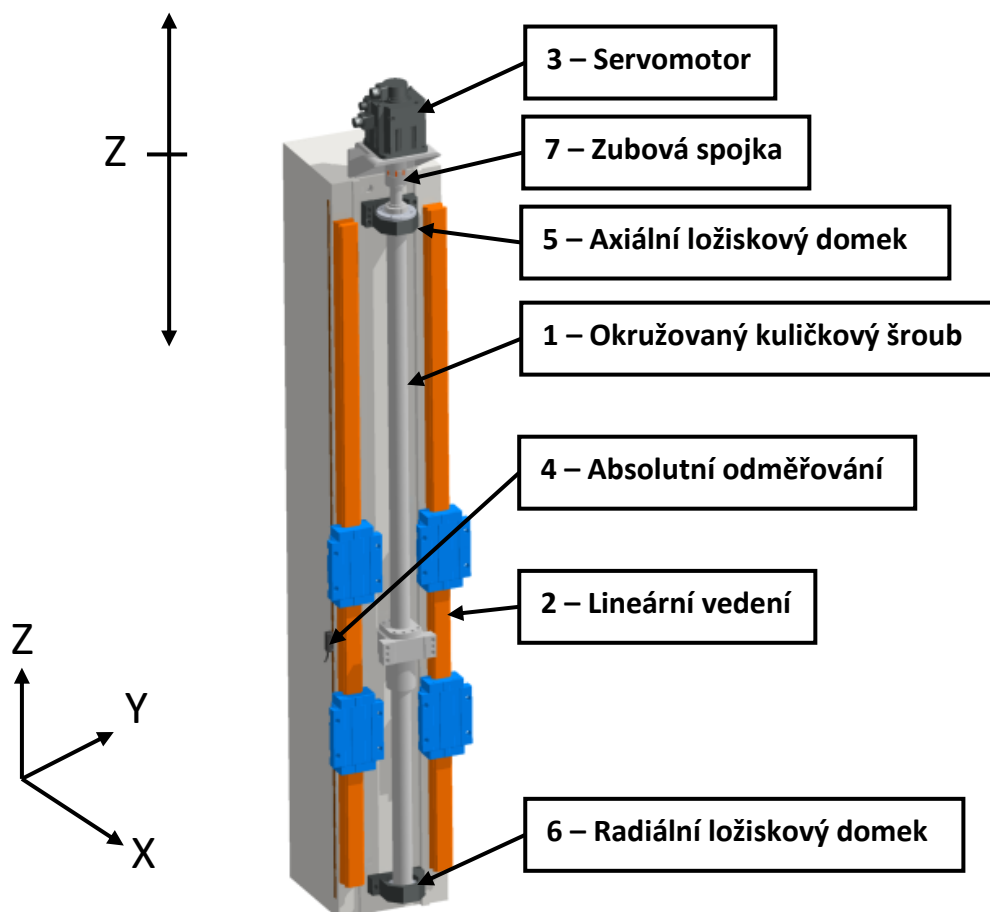
$$M_k = \frac{F_k \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{1240 \cdot 10}{2000 \cdot \pi \cdot 0,88} = 2,24 \text{ Nm} \quad (43)$$

Pohybový šroub DDB R50-010 od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu 14 682 hodin. Pro kroutící moment 2,24 Nm byl zvolen motor FRMM1K2B513C od firmy HIWIN.



8.3.2 Konstrukce pohybové jednotky

Na Obr. 8.7 je znázorněna pohybová jednotka osy Z. Pohybová jednotka se skládá z okružovaného kuličkového šroubu (1), lineárního vedení (2) a servomotoru (3), absolutního magnetického odměřování (4). Okružovaný kuličkový šroub je uložen v axiální ložiskový domek (5) a radiálním ložiskovým domek (6). Servomotor a okružovaný kuličkový šroub je spojený zubovou spojkou (7).



Obr. 8.7 - Pohybová jednotka osy Z



V Tab. 8.11 jsou parametry okružovaného kuličkového šroubu DDB5010-R-4EF s dvojitou předepnutou přírubovou maticí od firmy HIWIN s.r.o. Dynamická únosnost kuličkového šroubu je 52 800 N a statický únosnost je 106 800 N. Kuličkový šroub je uložen v ložiskových domcích SFA-40 s radiálním a axiálním uložením a v ložiskovém domku SLA-40 s axiálním uložením. [12]

Označení	ds	P	D	D ₁	D ₂	D ₃
DDB5010-R-4EF	50	10	75	110	93	11,0
Uspořádání otvorů	L	L ₁	L ₂	L ₃	S	B
2	164	16	16	8	M8x1	85
dk	C _{dyn} [N]		C ₀ [N]		Hmotnost [kg]	
45,8	52 800		106 800		2,5	

Tab. 8.11 - Parametry kuličkového šroubu [12]

V Tab. 8.12 jsou znázorněny parametry servopohonu FRMM1K2B513C od firmy HIWIN s.r.o. Servopohon je vybaven frekvenčním měničem. Jmenovitý výkon servopohonu je 1 kW, maximální otáčky jsou 3000 ot/min. Maximální moment je 14,3 Nm. [12]

Označení		Brzda	L [mm]	Hřídel s perem		P [W]	U [V AC]
FRMM1K2B513C		ano	172,5	ano		1000	220 1f
T _c [Nm]	T _p [Nm]	I _c [A]	I _p [A]	n _c [1/min]	n _p [1/min]	Hmotnost [kg]	
4,77	14,3	5,1	15,3	2000	3000	6,2	

Tab. 8.12 - Parametry servopohonu [12]



Magnetické absolutní odměřování RLS LA11 od firmy HIWIN s.r.o. s přesností systému $\pm 40 \mu\text{m/m}$. Maximální rozlišení je $0,244 \mu\text{m}$ a maximální rychlost, kterou dokáže odměřování stále pracovat je 7 m/s . V Tab. 8.13 jsou parametry magnetického absolutního odměřování. [12]

Označení	Roztečná stupnice [mm]	Přesnost systému [$\mu\text{m/m}$]	Max. rozlišení [μm]	Max. délka stupnice [mm]	Max. rychlost [m/s]	Výstupní signály	Délka kabelu [m]	Napájení
LA11	2	± 40	0,244	16.3	7	SSI, SPI, BiSS	1	A 5V B 8-30V

Tab. 8.13 - Parametry absolutního magnetického odměřování [12]

V Tab. 8.14 jsou parametry zubové spojky ROTEX 24 Spider 98 Sh-A od firmy KTR s.r.o. Jmenovitý točivý moment spojky je 60 Nm .

Velikost	T_{KN} [Nm]	d_{max}	D_H	D_K	L	l_1, l_2
24	60	32	55	57,5	54	18
E	b	s	t	e	M	T_A [Nm]
18	14	2	11	20	M6	10

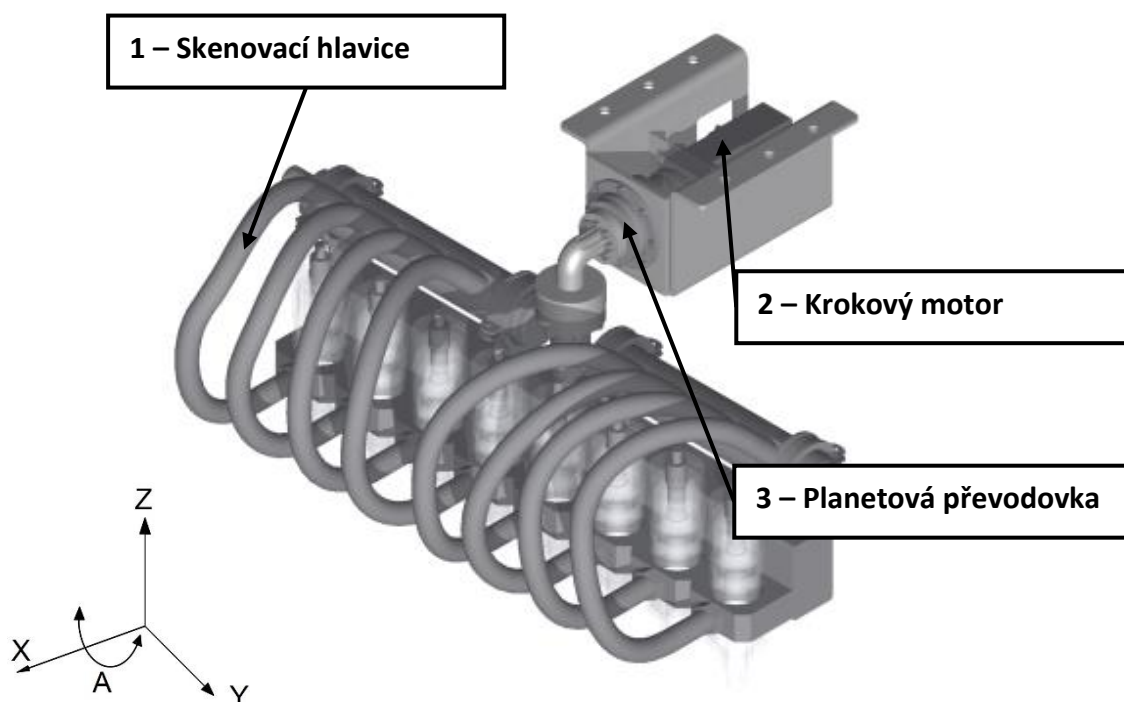
Tab. 8.14 - Parametry zubové spojky [15]



8.4 Polohovací jednotka skenovací hlavice

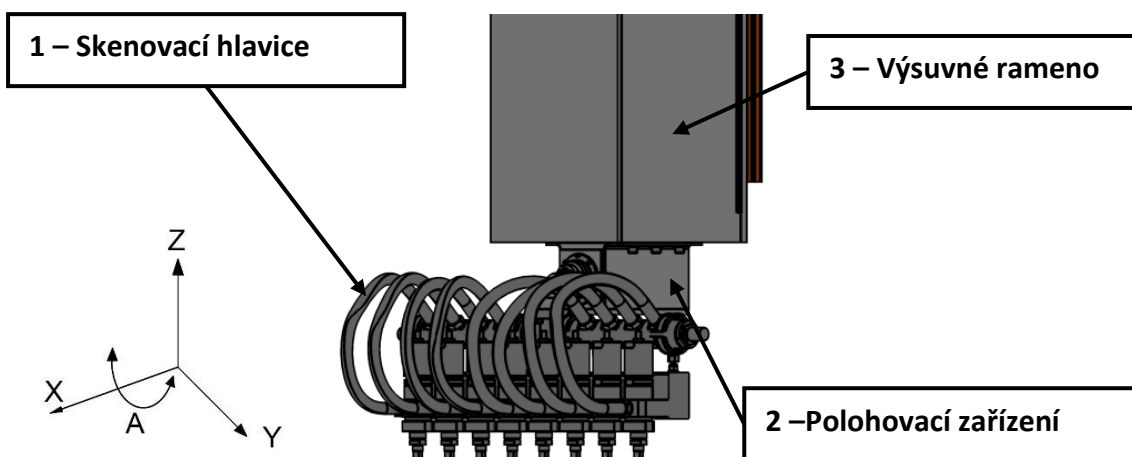
Na Obr. 8.8 je znázorněn detail polohovacího zařízení se skenovací hlavicí (1). Polohovací zařízení se skládá z krokového motoru EMMS-ST-57-S-SE-G2 s enkodérem (2) od firmy Festo s.r.o a planetové převodovky AD0642-P0403100404 (3) od firmy Apex Dynamics s.r.o.

Polohovací zařízení se naklápí v rozsahu $\pm 10^\circ$ podél skenované plochy.



Obr. 8.8 - Detail polohovacího zařízení

Na Obr. 8.9 je znázorněna pozice polohovacího zařízení (2) skenovací hlavice (1). Toto zařízení je upevněno k výsuvnému rameni (3).



Obr. 8.9 - Pozice polohovacího zařízení



9. Závěr a zhodnocení

Hlavním cílem diplomové práce byl návrh zařízení pro automatické skenování zakřivených ploch pro ultrazvukové zkoušení materiálů. Skenovaným dílem byla klapka AIRBUSU A380. Pro ultrazvukové skenování byla použita technologie Squirter sondy, z důvodu velkých rozměrů klapky křídla AIRBUSU A380.

Byla provedena rešerše možných konstrukčních typů skenovacího zařízení, včetně průmyslových robotů jakožto nosičů skenovací hlavice.

Z provedené rešerše bylo vytvořeno pět možných konstrukčních návrhů. Jednotlivé návrhy se mezi sebou liší nosičem skenovací hlavice. Nosičem skenovací hlavice je buď průmyslový robot, nebo jednoúčelový manipulátor. Dále se mezi sebou liší uchycením skenovacího dílu na pracovním stole nebo do upínacího přípravku. Z těchto pěti návrhů byl vybrán portálový skenovací manipulátor, jako výsledná varianta pro další zpracování. Pro tuto variantu byly provedeny návrhové výpočty pohybových jednotek jednotlivých os. Dále byla tato varianta zpracována do detailního 3D modelu. K tomuto 3D modelu výsledné varianty byla vytvořena výkresová dokumentace.

Celkový čas pro oskenování klapky křídla AIRBUSU A380 je přibližně 30 minut. Skenovací zařízení vykonává lineární pohyb v osách X, Y a Z. Dále se skenovací hlavice naklápí v ose A, podél povrchu klapky AIRBUSU A380.

Z důvodu robustnosti konstrukce a požadovaných vysokých rychlostí je potřeba provést i studii vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů celého zařízení. Kmitání soustavy bude mít vliv na přesnost a kvalitu měření.

Pohyb v ose X byl realizován ozubeným hřebenem a dvojicí pastorků upevněných na pravém i levém stojanu, stojany se pohybují po lineárních vedeních. Pohyb v ose Y byl realizován kuličkovým šroubem, který pohybuje křížovými saněmi. Křížové saně se pohybují po lineárním vedením. Pohyb osy Z byl realizován kuličkovým šroubem, který pohybuje výsuvným ramenem. Výsuvné rameno se pohybuje po lineárním vedení. Naklápění skenovací hlavice je realizováno krokovým motorem s planetovou převodovkou, skenovací hlavice se naklápí v ose A.

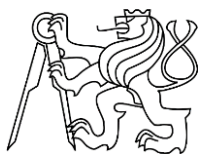
Tato práce bude sloužit jako podklad pro firmu ATG s.r.o při navrhování automatizovaného skenovacího zařízení pro rozměrné skenovací díly pro ultrazvukové skenování.



10. Seznamy

10.1 Použitá literatura

- [1] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [2] CHVÁLA, Břetislav, Jaroslav TALÁČKO a Robert MATIČKA. *Průmyslové roboty a manipulátory*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 275 s. ISBN 80-03-00361-x.
- [3] *IMG Ultrasuoni* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.img-us.com/solutions-for-non-destructive-testing-ndt/squirter-ut-inspection-system-using-a-water-column-coupling-system>
- [4] *ABB Robotika* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs>
- [5] *KUKA Robotics* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/roboticke-systemy/prumyslove-roboty>
- [6] *MOTOMAN* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.motoman.cz/>
- [7] *STAUBLI Robotics* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/en-cz/robotics/>
- [8] *FANUC* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty>
- [9] *INDETEC NDT* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.indetec.cz/cz/produkty>
- [10] *TECSCAN* [online]. 3.1.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.tecscan.ca/products/ultrasonic-immersion-scanners/tcis/>
- [11] *PMI Lineární vedení* [online]. 23.3.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: http://www.loziska.com/store/lin_vedeni_pmi.pdf
- [12] *HIWIN* [online]. 23.3.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/3d/download>



[13] *APEX DYNAMICS* [online]. 28.5.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.apexdyna.com/index.aspx>

[14] *FESTO* [online]. 21.6.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/index.htm

[15] *KTR Spojky* [online]. 15.6.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.spojky-ktr.cz/rotex-standard>

[16] *SIEMENS* [online]. 15.6.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/goos/WelcomePage.aspx?regionUrl=/CZ&language=cs>

[17] KUGL, Otmar. Projekt - III. ročník. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03205-1.]

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1.1 - 3D model klapky křídla AIRBUSU A380	12
Obr. 2.1 – Průchodová metoda.....	14
Obr. 2.2 – Metoda odrazová.....	15
Obr. 2.3 – Squirter sondy	16
Obr. 3.1 – Rozdělení manipulačních zařízení.....	17
Obr. 4.1 - Souřadnicový manipulátor od Firmy INDETEC ndt.....	19
Obr. 4.2 - Ultrazvukový manipulátor od firmy TECSCAN s.r.o.....	19
Obr. 5.1 – Robot ABB IRB 2600ID – 8/2.00.....	20
Obr. 5.2 – Robot ABB IRB 2600 – 12/1.85	21
Obr. 5.3 – Robot Kuka KR 12 R1810.....	22
Obr. 5.4 – Robot Kuka KR 8 R2100 arc HW.....	23
Obr. 5.5 – Robot Yaskawa HP 20D – 6	24
Obr. 5.6 – Robot Stäubli RX 160L.....	25
Obr. 5.7 – Robot Fanuc M – 10iA/8L	26
Obr. 6.1 – Lineární pojezd ABB IRBT 2005.....	29
Obr. 6.2 – Lineární pojezd Kuka KL 250 – 3	30
Obr. 6.3 – Lineární pojezd Yaskawa TLS 1000.....	30
Obr. 7.1 - Návrh skenovacího zařízení Č.1	32
Obr. 7.2 - Návrh skenovacího zařízení Č.1 - pohled shora.....	33
Obr. 7.3 - Návrh skenovacího zařízení Č.1 - pohled v řezu	33
Obr. 7.4 - Návrh skenovacího zařízení Č.2	34
Obr. 7.5 - Návrh skenovacího zařízení Č.2 - pohled shora.....	35



Obr. 7.6 - Návrh skenovacího zařízení Č.2 - pohled v řezu	35
Obr. 7.7 - Návrh skenovacího zařízení Č.3	36
Obr. 7.8 - Návrh skenovacího zařízení Č.3 - pohled shora.....	37
Obr. 7.9 - Návrh skenovacího zařízení Č.3 - pohled v řezu	37
Obr. 7.10 - Návrh skenovacího zařízení Č.4	38
Obr. 7.11 - Návrh skenovacího zařízení Č.4 - pohled shora.....	39
Obr. 7.12 - Návrh skenovacího zařízení Č.4 - pohled v řezu	39
Obr. 7.13 - Návrh skenovacího zařízení Č.5	40
Obr. 8.1 - 3D model - izometrický pohled.....	42
Obr. 8.2 - Výpočtové schéma pohybové jednotky ve směru X.....	43
Obr. 8.3 - Pohybová jednotka osy X.....	48
Obr. 8.4 - Výpočtové schéma pohybové jednotky ve směru Y.....	52
Obr. 8.5 - Pohybová jednotka osy Y.....	57
Obr. 8.6 - Výpočtové schéma pohybové jednotky ve směru Z.....	60
Obr. 8.7 - Pohybová jednotka osy Z.....	65
Obr. 8.8 - Detail polohovacího zařízení.....	68
Obr. 8.9 - Pozice polohovacího zařízení.....	68
Obr. I.1 - Schéma pohybové jednotky v ose X	II
Obr. I.2 - Schéma pohybové jednotky v ose Y	XIV
Obr. I.3 - Schéma pohybové jednotky v ose Z	XXIV



10.3 Seznam tabulek

Tab. 5.1 - Tabulka srovnání průmyslových robotů dle parametrů	27
Tab. 6.1 - Tabulka srovnání pojezdů dle parametrů	31
Tab. 8.1 - Parametry ozubeného hřebenu	49
Tab. 8.2 - Parametry pastorku	49
Tab. 8.3 - Parametry absolutního magnetického odměřování	50
Tab. 8.4 - Parametry lineárního vedení	50
Tab. 8.5 - Parametry synchronního motoru	51
Tab. 8.6 - Parametry lineárního vedení	58
Tab. 8.7 - Parametry kuličkového šroubu	58
Tab. 8.8 - Parametry servopohonu	59
Tab. 8.9 - Parametry absolutního magnetického odměřování	59
Tab. 8.10 - Parametry zubové spojky	59
Tab. 8.11 - Parametry kuličkového šroubu	66
Tab. 8.12 - Parametry servopohonu	66
Tab. 8.13 - Parametry absolutního magnetického odměřování	67
Tab. 8.14 - Parametry zubové spojky	67

10.4 Seznam použitého software

Autodesk Inventor Professional 2015

MS Word

Matlab R2014a

AutoCad 2013



10.5 Seznam příloh

- Výkresová dokumentace
 - DP1744-00-00-00-00 – SKENOVACÍ ZAŘÍZENÍ
 - 1744-00-00-00-0K – SKENOVACÍ ZAŘÍZENÍ
 - DP1744-01-00-00-00 – PORTÁL
 - 1744-01-00-00-0K – PORTÁL
 - DP1744-01-01-00-00 – PŘÍČKA
 - 1744-01-01-00-0K – PŘÍČKA
 - DP1744-01-01-01-00 – PŘÍČKA SVAŘENEC
 - 1744-01-01-01-0K – PŘÍČKA SVAŘENEC
 - DP1744-01-01-01-01 – SPODNÍ DESKA
 - DP1744-01-01-01-02 – HORNÍ DESKA
 - DP1744-01-01-01-03 – ČELO PŘÍČKY
 - DP1744-01-01-01-04 – BOK PŘÍČKY
 - DP1744-01-01-01-05 – VÝZTUHA
 - DP1744-01-01-01-06 – VZPĚRA
 - DP1744-01-01-02-00 – DRŽÁK ELEKTROMOTORU
 - DP1744-01-02-00-00 – PRAVÝ STOJAN
 - 1744-01-02-00-0K – PRAVÝ STOJAN
 - DP1744-01-02-01-00 – STOJAN PRAVÝ
 - 1744-01-02-01-0K – STOJAN PRAVÝ
 - DP1744-01-02-01-01 – VNITŘNÍ BOK
 - DP1744-01-02-01-02 – VNĚJŠÍ BOK
 - DP1744-01-02-01-03 – VRCHNÍ DESKA
 - DP1744-01-02-01-04 – ČELO
 - DP1744-01-02-01-05 – VZPĚRA
 - DP1744-01-02-01-06 – VÝZTUHA
 - DP1744-01-02-01-07 – SPODNÍ DESKA
 - DP1744-01-02-02-00 – KRYTOVÁNÍ ELEKTROMOTORU
 - DP1744-01-02-03-00 – DRŽÁK ELEKTROMOTORU
 - DP1744-01-03-00-00 – LEVÝ STOJAN
 - 1744-01-03-00-0K – STOJAN LEVÝ
 - DP1744-01-03-01-00 – STOJAN LEVÝ SVAŘENEC
 - 1744-01-03-01-0K – STOJAN LEVÝ SVAŘENEC
 - DP1744-01-03-02-00 – KRYTOVÁNÍ ELEKTROMOTORU
 - DP1744-01-04-00-00 – SKENOVACÍ HLAVICE
 - 1744-01-04-00-0K – SKENOVACÍ HLAVICE
 - DP1744-01-04-01-00 – DRŽÁK POLOHOVADLA SVAŘENEC
 - 1744-01-04-01-0K – DRŽÁK POLOHOVADLA SVAŘENEC



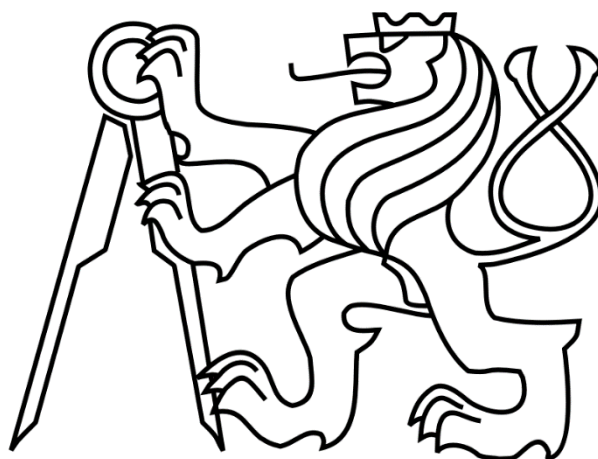
DP1744-01-04-01-01 – DRŽÁK POLOHOVADLA
DP1744-01-04-01-02 – PODPĚRA
DP1744-01-05-00-00 – VÝSUVNÉ RAMENO
1744-01-05-00-0K – VÝSUVNÉ RAMENO
DP1744-01-05-01-00 – VÝSUVNÉ RAMENO SVAŘENEC
1744-01-05-01-0K – VÝSUVNÉ RAMENO SVAŘENEC
DP1744-01-05-01-01 – ČELO
DP1744-01-05-01-02 – ZADNÍ DESKA
DP1744-01-05-01-03 – BOČNÍ DESKA
DP1744-01-05-01-04 – SPODNÍ DESKA
DP1744-01-05-01-05 – HORNÍ DESKA
DP1744-01-05-01-06 – VÝZTUHA
DP1744-01-05-02-00 – DRŽÁK ELEKTROMOTORU
DP1744-01-06-00-00 – KŘÍŽOVÉ SANĚ
1744-01-06-00-0K – KŘÍŽOVÉ SANĚ
DP1744-01-06-01-00 – KŘÍŽOVÉ SANĚ
DP1744-02-00-00-00 – LOŽE
1744-02-00-00-0K – LOŽE

- Textové přílohy
 - A. Pohybová jednotka osy X
 - B. Pohybová jednotka osy Y
 - C. Pohybová jednotka osy Z
- Elektronické přílohy (CD)
 - Text diplomové práce
 - Výkresová dokumentace
 - 3D modely skenovacího zařízení
 - Vizualizace

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Textová příloha



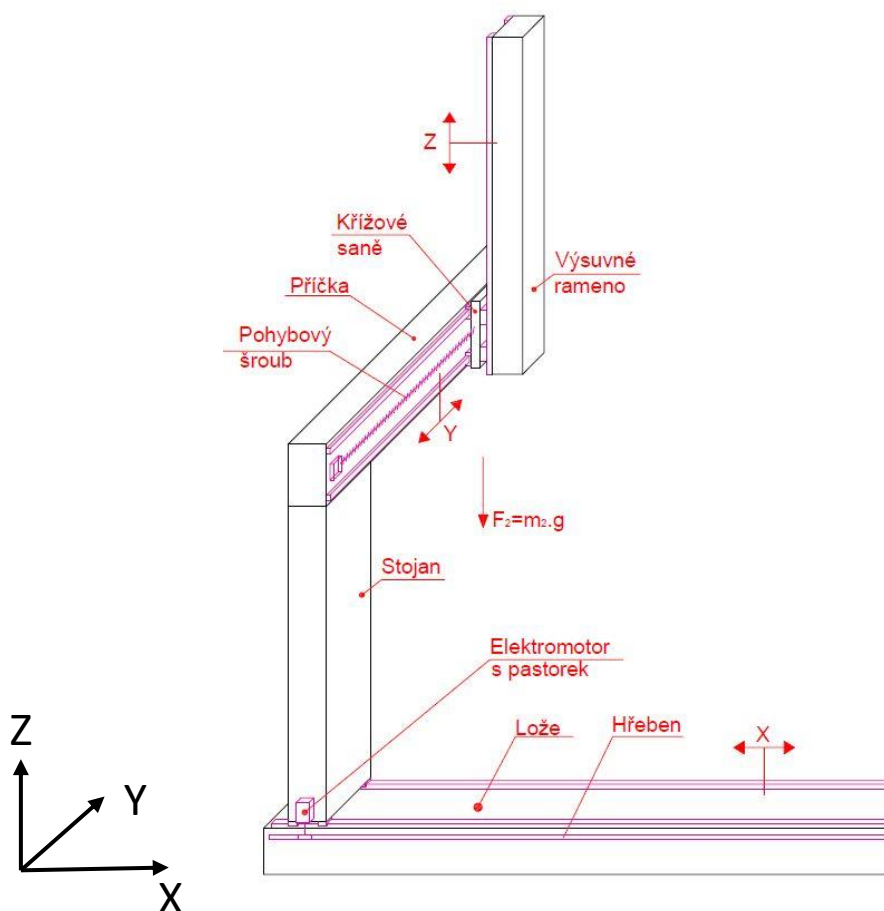
I. Výpočtová část

V této kapitole je popsán postup výpočtu pohybových jednotek jednotlivých os. Je zde proveden výpočet lineárního vedení, kuličkového šroubu, ozubeného hřebenu a pastorku pro pohyb v ose X. Jednotlivé servomotory, které tyto osy pohánějí.

A. Pohybová jednotka osy X

[11]

Na obrázku Obr. I.1 je znázorněná pohybová jednotka osy X, která se skládá z lineárního vedení, kuličkového šroubu a servomotoru. Hmotnost celého portálu je 2600, pro výpočet lineárního vedení se uvažuje poloviční hmotnost 1300 kg z důvodu rozložení hmotnosti celého portálu na dvě lineární osy.



Obr. I.1 - Schéma pohybové jednotky v ose X

Zadané hodnoty jsou:

Hmotnost břemene [kg]	$m=1300$ kg
Posuvová rychlost [m/s]	$v=1$ m/s
Zdvih [m]	$h=14$ m



Dráha pro zrychlení [m]	$x_1=1,5$ m
Dráha rovnoměrného pohybu [m]	$x_2=11$ m
Dráha pro brždění [m]	$x_3=1,5$ m
Celkový počet cyklů [-]	$n=50$
Vzdálenost mezi středy vozíky [m]	$l_1=0,242$ m
Vzdálenost mezi středy kolejnic [m]	$l_2=0,29$ m
Vzdálenost v Y-ové ose mezi středem břemena a působící silou [m]	$l_3=0,011$ m
Vzdálenost v X-ové ose mezi středem břemena a působící silou [m]	$l_4=1,7$ m

Výpočet zrychlení a celkového času:

$$a_1 = \frac{v^2}{x_1} = \frac{1}{1,5} = 0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$a_3 = \frac{v^2}{x_3} = \frac{1}{1,5} = 0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

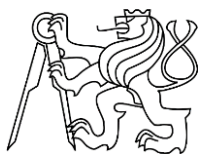
$$t_1 = \sqrt{\frac{x_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{1,5}{0,67}} = 1,5 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{x_2}{v} = \frac{11}{1} = 11 \text{ s}$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{x_3}{a_3}} = \sqrt{\frac{1,5}{0,67}} = 1,5 \text{ s}$$

$$t_{c1} = t_1 + t_2 + t_3 = 1,5 + 11 + 1,5 = 14 \text{ s}$$

$$t_c = t_{c1} \cdot n = 14 \cdot 50 = 700 \text{ s} \approx 12 \text{ min}$$



Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro rovnoměrný pohyb:

$$P_1 = \frac{m \cdot g}{4} + \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$
$$= \frac{1300 \cdot 9,81}{4} + \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 0,011}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,29} = 40\,585 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{m \cdot g}{4} - \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$
$$= \frac{1300 \cdot 9,81}{4} - \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 0,011}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,29} = 40\,278 \text{ N}$$

$$P_3 = \frac{m \cdot g}{4} - \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$
$$= \frac{1300 \cdot 9,81}{4} - \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 0,011}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,29} = -34\,481 \text{ N}$$

$$P_4 = \frac{m \cdot g}{4} + \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$
$$= \frac{1300 \cdot 9,81}{4} + \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 0,011}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 9,81 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,29} = -33\,901 \text{ N}$$

Výpočet zátěže pro jednotlivá vozíků pro zrychlený pohyb ve směru -X:

$$P_{1l_{a_1}} = P_1 + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,585 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,585 \text{ N}$$

$$P_{2l_{a_1}} = P_2 - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,278 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,278 \text{ N}$$

$$P_{3l_{a_1}} = P_3 - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -34\,481 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -34\,481 \text{ N}$$



$$P_{4l_{a_1}} = P_4 + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -33\,901 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -33\,901 \text{ N}$$

$$P_{t1l_{a_1}} = -\frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$

$$P_{t2l_{a_1}} = \frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$

$$P_{t3l_{a_1}} = \frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$

$$P_{t4l_{a_1}} = -\frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zrychlený pohyb ve směru +X:

$$P_{1r_{a_1}} = P_1 - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,585 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,585 \text{ N}$$

$$P_{2r_{a_1}} = P_2 + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,278 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,278 \text{ N}$$

$$P_{3r_{a_1}} = P_3 + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -34\,481 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -34\,481 \text{ N}$$

$$P_{4r_{a_1}} = P_4 - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -33\,901 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -33\,901 \text{ N}$$



$$P_{t1ra_1} = \frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$
$$P_{t2ra_1} = -\frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$
$$P_{t3ra_1} = -\frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$
$$P_{t4ra_1} = \frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zpomalený pohyb ve směru -X:

$$P_{1la_3} = P_1 - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,585 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,585 \text{ N}$$
$$P_{2la_3} = P_2 + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,278 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,278 \text{ N}$$
$$P_{3la_3} = P_3 + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -34\,481 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -34\,481 \text{ N}$$
$$P_{4la_3} = P_4 - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -33\,901 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -33\,901 \text{ N}$$



$$P_{t1l_{a_3}} = \frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$
$$P_{t2l_{a_3}} = -\frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$
$$P_{t3l_{a_3}} = -\frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$
$$P_{t4l_{a_3}} = \frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zpomalený pohyb ve směru +X:

$$P_{1r_{a_3}} = P_1 + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,585 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,585 \text{ N}$$
$$P_{2r_{a_3}} = P_2 - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= 40\,278 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = 40\,278 \text{ N}$$
$$P_{3r_{a_3}} = P_3 - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -34\,481 - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} - \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -34\,481 \text{ N}$$
$$P_{4r_{a_3}} = P_4 + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1}$$
$$= -33\,901 + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} + \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 0}{2 \cdot 0,242} = -33\,901 \text{ N}$$



$$P_{t1r_{a_3}} = -\frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$

$$P_{t2r_{a_3}} = \frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$

$$P_{t3r_{a_3}} = \frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = 3044 \text{ N}$$

$$P_{t4r_{a_3}} = -\frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{1300 \cdot 0,67 \cdot 1,7}{2 \cdot 0,242} = -3044 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentního zátěže v rovnoměrném pohybu:

$$P_{E1} = P_1 = 40\,585 \text{ N}$$

$$P_{E2} = P_2 = 40\,27 \text{ N}$$

$$P_{E3} = P_3 = -34\,481 \text{ N}$$

$$P_{E4} = P_4 = -33\,901 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zrychlení ve směru -X:

$$P_{E1l_{a_1}} = |P_{1l_{a_1}}| + |P_{t1l_{a_1}}| = 40\,585 + 3044 = 43\,629 \text{ N}$$

$$P_{E2l_{a_1}} = |P_{2l_{a_1}}| + |P_{t2l_{a_1}}| = 40\,278 + 3044 = 43\,322 \text{ N}$$

$$P_{E3l_{a_1}} = |P_{3l_{a_1}}| + |P_{t3l_{a_1}}| = 34\,481 + 3044 = 37\,525 \text{ N}$$

$$P_{E4l_{a_1}} = |P_{4l_{a_1}}| + |P_{t4l_{a_1}}| = 33\,901 + 3044 = 36\,945 \text{ N}$$



Výpočet ekvivalentní zátěže během zrychlení směrem +X:

$$P_{E1r_{a_1}} = |P_{1r_{a_1}}| + |P_{t1r_{a_1}}| = 40\,585 + 3044 = 43\,629 \text{ N}$$

$$P_{E2r_{a_1}} = |P_{2r_{a_1}}| + |P_{t2r_{a_1}}| = 40\,278 + 3044 = 43\,322 \text{ N}$$

$$P_{E3r_{a_1}} = |P_{3r_{a_1}}| + |P_{t3r_{a_1}}| = 34\,481 + 3044 = 37\,525 \text{ N}$$

$$P_{E4r_{a_1}} = |P_{4r_{a_1}}| + |P_{t4r_{a_1}}| = 33\,901 + 3044 = 36\,945 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zpomalení ve směru -X:

$$P_{E1l_{a_3}} = |P_{1l_{a_3}}| + |P_{t1l_{a_3}}| = 40\,585 + 3044 = 43\,629 \text{ N}$$

$$P_{E2l_{a_3}} = |P_{2l_{a_3}}| + |P_{t2l_{a_3}}| = 40\,278 + 3044 = 43\,322 \text{ N}$$

$$P_{E3l_{a_3}} = |P_{3l_{a_3}}| + |P_{t3l_{a_3}}| = 34\,481 + 3044 = 37\,525 \text{ N}$$

$$P_{E4l_{a_3}} = |P_{4l_{a_3}}| + |P_{t4l_{a_3}}| = 33\,901 + 3044 = 36\,945 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zpomalení ve směru +X:

$$P_{E1r_{a_3}} = |P_{1r_{a_3}}| + |P_{t1r_{a_3}}| = 40\,585 + 3044 = 43\,629 \text{ N}$$

$$P_{E2r_{a_3}} = |P_{2r_{a_3}}| + |P_{t2r_{a_3}}| = 40\,278 + 3044 = 43\,322 \text{ N}$$

$$P_{E3r_{a_3}} = |P_{3r_{a_3}}| + |P_{t3r_{a_3}}| = 34\,481 + 3044 = 37\,525 \text{ N}$$

$$P_{E4r_{a_3}} = |P_{4r_{a_3}}| + |P_{t4r_{a_3}}| = 33\,901 + 3044 = 36\,945 \text{ N}$$



Výpočet střední zátěže jednotlivých vozíků:

$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E1r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{43\,629^3 \cdot 1,5 + 40\,585^3 \cdot 11 + 43\,629^3 \cdot 1,5 + 43\,629^3 \cdot 1,5 + 40\,585^3 \cdot 11 + 43\,629^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$
$$= 41\,275 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{P_{E2l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E2r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{43\,322^3 \cdot 1,5 + 40\,278^3 \cdot 11 + 43\,322^3 \cdot 1,5 + 43\,322^3 \cdot 1,5 + 40\,278^3 \cdot 11 + 43\,322^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$
$$= 40\,969 \text{ N}$$

$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{P_{E3l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E3r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{37\,525^3 \cdot 1,5 + (-34\,481)^3 \cdot 11 + 37\,525^3 \cdot 1,5 + 37\,525^3 \cdot 1,5 + (-34\,481)^3 \cdot 11 + 37\,525^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$
$$= -27\,540 \text{ N}$$

$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{P_{E4l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E4r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{36\,945^3 \cdot 1,5 + (-33\,901)^3 \cdot 11 + 36\,945^3 \cdot 1,5 + 36\,945^3 \cdot 1,5 + (-33\,901)^3 \cdot 11 + 36\,945^3 \cdot 1,5}{2 \cdot 14}}$$
$$= -27\,056 \text{ N}$$

Nejvyšší zátěž je na vozík č. 1, podlé této zátěže se volí lineární vedení pohybové jednotky v ose X.

Statická a dynamická únosnost vozíků:

$$C_0 = 303\,130 \text{ N}$$

$$C = 208\,360 \text{ N}$$



Statický faktor:

$$f_s = \frac{C_0}{P_{E1a_1}} = \frac{303\,130}{43\,629} = 6,95 [-]$$

Faktor zatížení pro mírné rázy a vibrace při rychlostech 60 až 120 m/min

$$f_w = 2 [-]$$

Nominální životnost lineárního vedení:

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 41\,275} \right)^3 \cdot 50 = 804 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 40\,969} \right)^3 \cdot 50 = 822 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 27\,540} \right)^3 \cdot 50 = 2\,706 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{208\,360}{2 \cdot 27\,056} \right)^3 \cdot 50 = 2\,854 \text{ km}$$

Provozní životnost lineárního vedení:

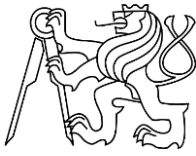
$$L_{h1} = \frac{L_1 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{804 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 478,5 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \frac{L_2 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{822 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 489,3 \text{ h}$$

$$L_{h3} = \frac{L_3 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{2\,706 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 1610 \text{ h}$$

$$L_{h4} = \frac{L_4 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{2854 \cdot 1000}{2 \cdot 14 \cdot 60 \cdot 50} = 1698,8 \text{ h}$$

Lineární vedení HGW 65HC od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu 478 hodin.



Výpočet hřebenu a pastorku – zadané hodnoty:

[17]

Hmotnost břemene [kg]	$m=2700$ kg
Gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]	$g=9,81$ $m \cdot s^{-2}$
Účinnost ozubeného převodu [-]	$\eta=0,98$
Celkový převodový poměr [-]	$i_c=1$
Normálový modul [mm]	$m_n=5$
Počet zubu [-]	$z=24$
Úhel sklonu zubu [$^\circ$]	$\beta=15^\circ$
Normálový úhel záběru [$^\circ$]	$\alpha_n=20^\circ$
Otáčky motoru [min^{-1}]	$n=6000$ min^{-1}

$$F=m \cdot g=2700 \cdot 9,81=26\,487 \text{ N}$$

Výpočet elektromotoru:

$$P = \frac{F \cdot v}{4000} = \frac{26\,487 \cdot 1}{4000} = 6,6 \text{ W}$$

$$P_m = \frac{P}{\eta} = \frac{6,6}{0,98} = 6,75 \text{ W}$$

Čelní ozubené kolo se šikmými zuby:

$$t_n = \pi \cdot m_n = \pi \cdot 5 = 15,71 \text{ mm}$$

$$s_n = \frac{t_n}{2} = 7,85 \text{ mm}$$

$$m_t = \frac{m_n}{\cos(\beta)} = \frac{5}{\cos(15)} = 5,176 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{t_n}{\cos(\beta)} = \frac{15,71}{\cos(15)} = 16,3 \text{ mm}$$

$$h_a = m_n = 5 \text{ mm}$$

$$h_f = 1,25 \cdot m_n = 1,25 \cdot 5 = 6,25 \text{ mm}$$

$$d = \frac{m_n \cdot z}{\cos(\beta)} = \frac{5 \cdot 24}{\cos(15)} = 124,2 \text{ mm}$$

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = 124,2 + 2 \cdot 5 = 134,2 \text{ mm}$$



$$d_f = d - 2 \cdot h_f = 124,2 - 2 \cdot 6,25 = 111,73 \text{ mm}$$

$$d_b = d \cdot \cos(\alpha) = 124,2 \cdot \cos(20) = 116,7 \text{ mm}$$

$$n_p = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot d_a \cdot 10^{-3}} = \frac{60 \cdot 1}{\pi \cdot 134,2 \cdot 10^{-3}} = 142,3 \text{ min}^{-1}$$

$$M_k = \frac{2000 \cdot F}{4 \cdot d} = \frac{2000 \cdot 26\,487}{4 \cdot 124,2} = 411,3 \text{ N}$$

$$i_{přev} = 8$$

$$M_m = \frac{M_k}{i_{přev}} = \frac{411,3}{8} = 51,4 \text{ Nm}$$

$$P_p = \frac{P_m}{i_{přev}} = \frac{6,75}{8} = 0,845 \text{ W}$$

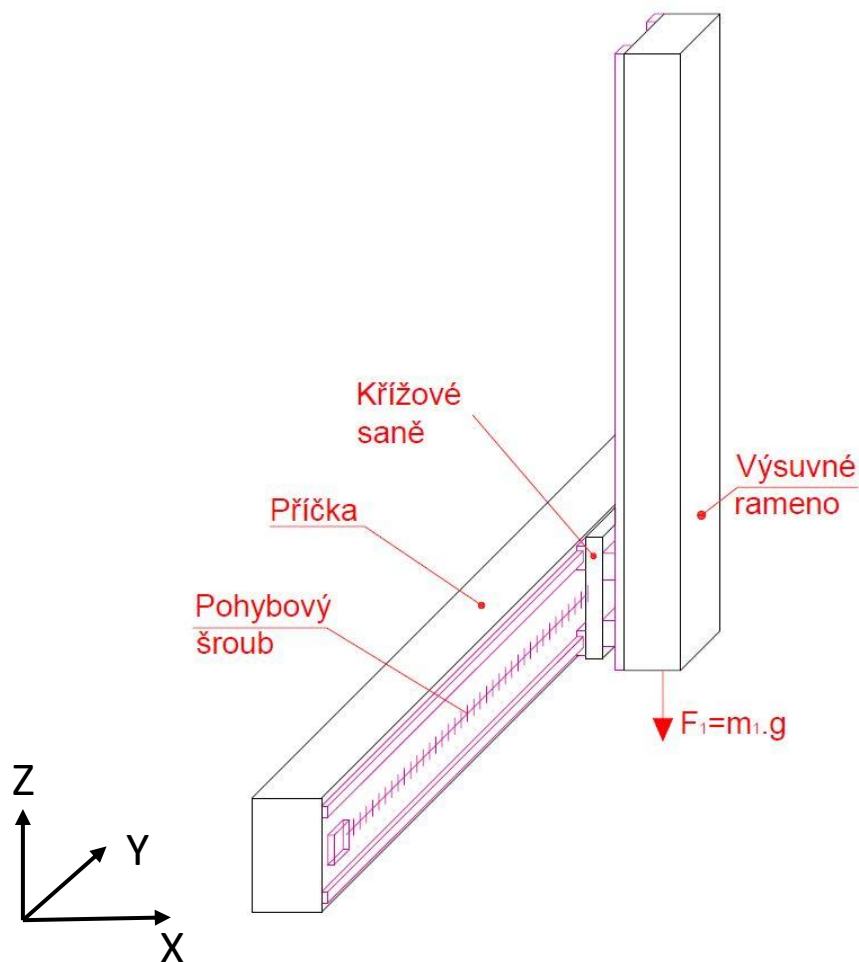
Z výpočtu vyšel pastorek F05L24B45 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. Dále podle pastorku byl zvolen hřeben 0504R100C10 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o. K pohybu pastorku byl zvolen synchronní motor 1FK7086-4CF1-1CH2 od firmy SIEMENS s.r.o. a k tomu vybrána planetová převodovka AF1401-P0401500202 od firmy APEX DYNAMICS s.r.o.



B. Pohybová jednotka osy Y

[11]

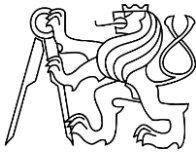
Na obrázku Obr. 1.2 je znázorněná pohybová jednotka osy Z, která se skládá z lineárního vedení, kuličkového šroubu a servomotoru.



Obr. 1.2 - Schéma pohybové jednotky v ose Y

Zadané hodnoty jsou:

Hmotnost břemene [kg]	$m_2=610$ kg
Posuvová rychlost [m/s]	$v=1$ m/s
Zdvih [m]	$h=3,5$ m
Dráha pro zrychlení [m]	$x_1=0,5$ m
Dráha rovnoměrného pohybu [m]	$x_2=2,5$ m
Dráha pro brždění [m]	$x_3=0,5$ m
Gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]	$g=9,81$ $m \cdot s^{-2}$



Celkový počet cyklů [-]	$n=18$
Vzdálenost mezi středy vozíky [m]	$l_1=0,4$ m
Vzdálenost mezi středy kolejnic [m]	l_2 0,4 m
Vzdálenost v X-ové ose mezi středem břemenu a působící silou [m]	$l_4=0,055$ m

Výpočet zrychlení a celkového času:

$$a_1 = \frac{v^2}{x_1} = \frac{1^2}{0,5} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$a_3 = \frac{v^2}{x_3} = \frac{1^2}{0,5} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{x_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{0,8}{2}} = 0,5 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{x_2}{v} = \frac{2,5}{1} = 2,5 \text{ s}$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{x_3}{a_3}} = \sqrt{\frac{0,5}{2}} = 0,5 \text{ s}$$

$$t_{c1} = t_1 + t_2 + t_3 = 0,5 + 2,5 + 0,5 = 3,5 \text{ s}$$

$$t_c = t_{c1} \cdot n = 3,5 \cdot 18 = 63 \text{ s}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro rovnoměrný pohyb:

$$P_1 = \frac{m_2 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 263,3 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{m_2 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 263,3 \text{ N}$$

$$P_3 = \frac{m_2 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 263,3 \text{ N}$$

$$P_4 = \frac{m_2 \cdot g \cdot 4}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 263,3 \text{ N}$$



Výpočet zátěže pro jednotlivá vozíků pro zrychlený pohyb ve směru -Y:

$$P_{1la_1} = P_1 - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{2la_1} = P_2 + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{3la_1} = P_3 - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{4la_1} = P_4 + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{t1a_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t2a_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t3a_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t4a_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zrychlený pohyb ve směru +Y:

$$P_{1ra_1} = P_1 + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{2tr} = P_2 - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{3ra_1} = P_3 + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{4ra_1} = P_4 - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$



$$P_{t1ra_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t2ra_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t4ra_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t4ra_1} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zpomalený pohyb ve směru -Y:

$$P_{1la_3} = P_1 + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{2la_3} = P_2 - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{3la_3} = P_3 + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{4la_3} = P_4 - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{t1la_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t2ua_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t3ua_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t4ua_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610,9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$



Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zpomalený pohyb ve směru +Y:

$$P_{1ra_3} = P_1 - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{2ra_3} = P_2 + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{3ra_3} = P_3 - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 179,4 \text{ N}$$

$$P_{4ra_3} = P_4 + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_2} = 263,3 + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,4} = 347,2 \text{ N}$$

$$P_{t1ra_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t2ra_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t3ra_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} - \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

$$P_{t4ra_3} = \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{610 \cdot 9,81}{4} + \frac{610 \cdot 2 \cdot 0}{2 \cdot 0,4} = 1496 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentního zátěže v rovnoměrném pohybu:

$$P_{E1} = P_1 = 263,3 \text{ N}$$

$$P_{E2} = P_2 = 263,3 \text{ N}$$

$$P_{E3} = P_3 = 263,3 \text{ N}$$

$$P_{E4} = P_4 = 263,3 \text{ N}$$



Výpočet ekvivalentní zátěže během zrychlení ve směru -Y:

$$P_{E1l_{a_1}} = |P_{1l_{a_1}}| + |P_{t1l_{a_1}}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

$$P_{E2l_{a_1}} = |P_{2l_{a_1}}| + |P_{t2l_{a_1}}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

$$P_{E3l_{a_1}} = |P_{3l_{a_1}}| + |P_{t3l_{a_1}}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

$$P_{E4l_{a_1}} = |P_{4l_{a_1}}| + |P_{t4l_{a_1}}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zrychlení ve směru +Y:

$$P_{E1r_{a_1}} = |P_{1r_{a_1}}| + |P_{t1r_{a_1}}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

$$P_{E2r_{a_1}} = |P_{2r_{a_1}}| + |P_{t2r_{a_1}}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

$$P_{E3r_{a_1}} = |P_{3r_{a_1}}| + |P_{t3d_r}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

$$P_{E4r_{a_1}} = |P_{4r_{a_1}}| + |P_{t4r_{a_1}}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

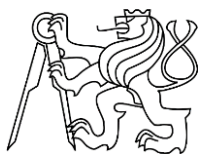
Výpočet ekvivalentní zátěže během zpomalení ve směru -Y:

$$P_{E1l_{a_3}} = |P_{1l_{a_3}}| + |P_{t1l_{a_3}}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

$$P_{E2l_{a_3}} = |P_{2l_{a_3}}| + |P_{t2l_{a_3}}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

$$P_{E3l_{a_3}} = |P_{3l_{a_3}}| + |P_{t3l_{a_3}}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

$$P_{E4l_{a_3}} = |P_{4l_{a_3}}| + |P_{t4l_{a_3}}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$



Výpočet ekvivalentní zátěže během zpomalení ve směru +Y:

$$P_{E1ra_3} = |P_{1ra_3}| + |P_{t1ra_3}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

$$P_{E2ra_3} = |P_{2ra_3}| + |P_{t2ra_3}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

$$P_{E3ra_3} = |P_{3ra_3}| + |P_{t3ra_3}| = |179,4| + |1496| = 1675 \text{ N}$$

$$P_{E4ra_3} = |P_{4ra_3}| + |P_{t4ra_3}| = |347,2| + |1496| = 1843 \text{ N}$$

Výpočet střední zátěže jednotlivých vozíků:

$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1la_1}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1la_3}^3 \cdot x_3 + P_{E1ra_1}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1ra_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1675^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{P_{E2la_1}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2la_3}^3 \cdot x_3 + P_{E2ra_1}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2ra_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5 + 1675^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{P_{E3la_1}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3la_3}^3 \cdot x_3 + P_{E3ra_1}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3ra_3}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1675^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$



$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{P_{E4l_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4l_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E4r_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4r_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{1843^3 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1675^3 \cdot 0,5 + 1675 \cdot 0,5 + 263,3^3 \cdot 2,5 + 1843^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,5}}$$
$$= 1164,6 \text{ N}$$

Nejvyšší zátěž je na vozík č.1, podlé této zátěže se volí lineární vedení pohybové jednotky v ose Y.

Statická a dynamická únosnost vozíků:

$$C_0 = 76\,000 \text{ N}$$

$$C = 32\,750 \text{ N}$$

Statický faktor:

$$f_s = \frac{C_0}{P_{E1a_{a1}}} = \frac{76\,000}{1843} = 45,4 \text{ [-]}$$

Faktor zatížení pro silné rázy a vibrace při rychlostech vyšších 120 m/min

$$f_w = 3 \text{ [-]}$$

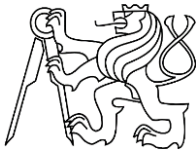
Nominální životnost lineárního vedení:

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}}\right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,6}\right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}}\right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,6}\right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}}\right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,6}\right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}}\right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 1164,6}\right)^3 \cdot 50 = 41\,183 \text{ km}$$



Provozní životnost lineárního vedení:

$$L_{h1} = \frac{L_1 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 5\,447,5 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \frac{L_2 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 5\,447,5 \text{ h}$$

$$L_{h3} = \frac{L_3 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 5\,447,50 \text{ h}$$

$$L_{h4} = \frac{L_4 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{41\,183 \cdot 1000}{2 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

Určení vzdáleností pohybové matice:

[12]

Nepodepřená délka hřídel [m] $l_k=3200 \text{ m}$

Vzdálenost mezi ložisky [m] $l_d=3600 \text{ m}$

Výpočet kontrolní vzpěrné tuhosti:

$$F_{max} = m_2 \cdot a_1 = 610 \cdot 2 = 1220 \text{ N}$$

$$F_k = 2 \cdot F_{max} = 2 \cdot 1220 = 2440 \text{ N}$$

Koeficient závislosti na uložení pohybového šroubu:

$$k_k=1,03 \text{ [-]}$$

$$d_k = \sqrt[4]{\frac{F_k \cdot l_k^2}{k_k \cdot 10^5}} = \sqrt[4]{\frac{2440 \cdot 3200^2}{1,03 \cdot 10^5}} = 22,2 \text{ mm}$$

Průměr hřídele pohybového šroubu dle katalogu:

$$d_{kk}=45,8 \text{ mm}$$

Jmenovitý průměr hřídele pohybového šroubu:

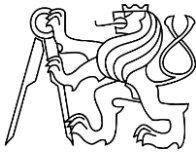
$$d_j=50 \text{ mm}$$

Stoupání pohybového šroubu: $P=10 \text{ mm}$

Účinnost pohybového šroubu: $\eta=0,88$

Dynamická únosnost pohybového šroubu:

$$C_{dyn}=52\,800 \text{ N}$$



Kontrolní výpočet maximálních otáček:

Koeficient uložení pohybového šroubu $k_d=1,22$

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_{kk} \cdot 10^8}{l_d^2} = \frac{1,22 \cdot 45,8 \cdot 10^8}{3600^2} = 431,1 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{max} = n_k \cdot \eta = 431,1 \cdot 0,88 = 379,4 \text{ min}^{-1}$$

Kontrola otáčkového faktoru:

$$\alpha = d_j \cdot n_{max} = 50 \cdot 379,4 = 18\,970 [-]$$

Maximální dovolený otáčkový faktor $\alpha_{max}=90\,000$

Kontrolní životnost pohybového šroubu:

$$n_m = \frac{n_{max} \cdot t_c}{1000} = \frac{379,4 \cdot 3,5}{1000} = 1,3 \text{ min}^{-1}$$

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_{max}^3 \cdot t_c}{1000}} = \sqrt[3]{\frac{1220^3 \cdot 3,5}{1000}} = 185,2 \text{ N}$$

$$L = \sqrt[3]{\frac{C_{dyn}}{F_m}} = \sqrt[3]{\frac{52800}{185,2}} = 6\,581\,200$$

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n_m \cdot 60} = \frac{6\,581\,200 \cdot 10^6}{1,3 \cdot 60} = 82\,601 \text{ hodin}$$

Výpočet hnacího kroutícího momentu:

$$M_k = \frac{F_k \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{2440 \cdot 10}{2000 \cdot \pi \cdot 0,88} = 4,4 \text{ Nm}$$

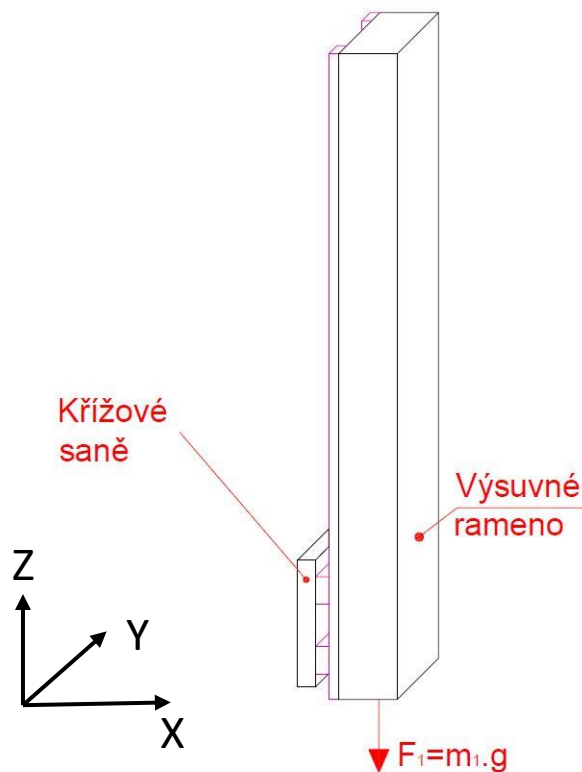
Pohybový šroub HGW65HC od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu 82 601 hodin.



C. Pohybová jednotka osy Z

[11]

Na obrázku Obr. I.3 je znázorněná pohybová jednotka osy Z, která se skládá z lineárního vedení, kuličkového šroubu a servomotoru.



Obr. I.3 - Schéma pohybové jednotky v ose Z

Zadané hodnoty jsou:

Hmotnost břemene [kg]	$m=310$ kg
Posuvová rychlost [m/s]	$v=1$ m.s ⁻¹
Zdvih [m]	$h=1,8$ m
Dráha pro zrychlení [m]	$x_1=0,5$ m
Dráha rovnoměrného pohybu [m]	$x_2=0,8$ m
Dráha pro brzdění [m]	$x_3=0,5$ m
Gravitační zrychlení [m.s ⁻²]	$g=9,81$ m.s ⁻²
Celkový počet cyklů [-]	$n=8$
Vzdálenost mezi středy vozíky [m]	$l_1=0,4$ m



Vzdálenost mezi středy kolejnic [m] $l_2=0,217$ m

Vzdálenost v Y-ové ose mezi osou pohybového šroubu a působící silou [m]

$$l_3=0,12$$
 m

Vzdálenost v X-ové ose mezi středem břemenu a působící silou [m]

$$l_4=0,085$$
 m

Výpočet zrychlení a celkového času:

$$a_1 = \frac{v^2}{x_1} = \frac{1^2}{0,5} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$a_3 = \frac{v^2}{x_3} = \frac{1^2}{0,5} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{x_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{0,8}{2}} = 0,5 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{x_2}{v} = \frac{0,8}{1} = 0,8 \text{ s}$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{x_3}{a_3}} = \sqrt{\frac{0,5}{2}} = 0,5 \text{ s}$$

$$t_{c1} = t_1 + t_2 + t_3 = 0,5 + 0,8 + 0,5 = 1,8 \text{ s}$$

$$t_c = t_{c1} \cdot n = 1,8 \cdot 8 = 14,4 \text{ s}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro rovnoměrný pohyb:

$$P_1 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$

$$P_3 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$

$$P_4 = \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot 9,81 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 456,2 \text{ N}$$



Výpočet zátěže pro jednotlivá vozíků pro zrychlený pohyb ve směru +Z:

$$P_{1ua_1} = P_1 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{2ua_1} = P_2 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{3ua_1} = P_3 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{4ua_1} = P_4 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{t1ua_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 - g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 - 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = -257,2 \text{ N}$$

$$P_{t2ua_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 - g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 - 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = -257,2 \text{ N}$$

$$P_{t3ua_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 - g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 - 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = -257,2 \text{ N}$$

$$P_{t4ua_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 - g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 - 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = -257,2 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zrychlený pohyb ve směru -Z:

$$P_{1da_1} = P_1 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

$$P_{2da_1} = P_2 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

$$P_{3da_1} = P_3 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

$$P_{4da_1} = P_4 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$



$$P_{t1da_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 389 \text{ N}$$

$$P_{t2da_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 389 \text{ N}$$

$$P_{t4da_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 389 \text{ N}$$

$$P_{t4da_1} = \frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 389 \text{ N}$$

Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zpomalený pohyb ve směru +Z:

$$P_{1ua_3} = P_1 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

$$P_{2ua_3} = P_2 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

$$P_{3ua_3} = P_3 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

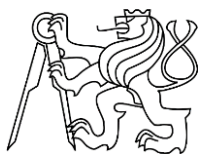
$$P_{4ua_3} = P_4 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 + \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 471 \text{ N}$$

$$P_{t1u_3} = -\frac{m_1 \cdot (a_3 + g) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = -389 \text{ N}$$

$$P_{t2u_3} = -\frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = -389 \text{ N}$$

$$P_{t3u_3} = -\frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = -389 \text{ N}$$

$$P_{t4u_3} = -\frac{m_1 \cdot (a_1 + g) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = -\frac{310 \cdot (2 + 9,81) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = -389 \text{ N}$$



Výpočet zátěže jednotlivých vozíků pro zpomalený pohyb ve směru -Z:

$$P_{1da_3} = P_1 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{2da_3} = P_2 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{3da_3} = P_3 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{4da_3} = P_4 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1} = 456,2 - \frac{310 \cdot 2 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,4} = 441,3 \text{ N}$$

$$P_{t1da_3} = \frac{m_1 \cdot (g - a_3) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (9,81 - 2) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = 257,2 \text{ N}$$

$$P_{t2da_3} = \frac{m_1 \cdot (g - a_3) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (9,81 - 2) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = 257,2 \text{ N}$$

$$P_{t3da_3} = \frac{m_1 \cdot (g - a_3) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (9,81 - 2) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = 257,2 \text{ N}$$

$$P_{t4da_3} = \frac{m_1 \cdot (g - a_3) \cdot l_4}{2 \cdot l_1} = \frac{310 \cdot (9,81 - 2) \cdot 0,085}{2 \cdot 0,4} = 257,2 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentního zátěže v rovnoměrném pohybu:

$$P_{E1} = P_1 = 456,2 \text{ N}$$

$$P_{E2} = P_2 = 456,2 \text{ N}$$

$$P_{E3} = P_3 = 456,2 \text{ N}$$

$$P_{E4} = P_4 = 456,2 \text{ N}$$



Výpočet ekvivalentní zátěže během zrychlení ve směru +Z:

$$P_{E1u_{a_1}} = |P_{1u_{a_1}}| + |P_{t1u_{a_1}}| = |441,3| + |-257| = 698,5 \text{ N}$$

$$P_{E2u_{a_1}} = |P_{2u_{a_1}}| + |P_{t2u_{a_1}}| = |441,3| + |-257| = 698,5 \text{ N}$$

$$P_{E3u_{a_1}} = |P_{3u_{a_1}}| + |P_{t3u_{a_1}}| = |441,3| + |-257| = 698,5 \text{ N}$$

$$P_{E4u_{a_1}} = |P_{4u_{a_1}}| + |P_{t4u_{a_1}}| = |441,3| + |-257| = 698,5 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zrychlení ve směru -Z:

$$P_{E1d_{a_1}} = |P_{1d_{a_1}}| + |P_{t1d_{a_1}}| = |471| + |389| = 860 \text{ N}$$

$$P_{E2d_{a_1}} = |P_{2d_{a_1}}| + |P_{t2d_{a_1}}| = |471| + |389| = 860 \text{ N}$$

$$P_{E3d_{a_1}} = |P_{3d_{a_1}}| + |P_{t3d_{a_1}}| = |471| + |389| = 860 \text{ N}$$

$$P_{E4d_{a_1}} = |P_{4d_{a_1}}| + |P_{t4d_{a_1}}| = |471| + |389| = 860 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zpomalení ve směru +Z:

$$P_{E1u_{a_3}} = |P_{1u_{a_3}}| + |P_{t1u_{a_3}}| = |471| + |-389| = 860 \text{ N}$$

$$P_{E2u_{a_3}} = |P_{2u_{a_3}}| + |P_{t2u_{a_3}}| = |471| + |-389| = 860 \text{ N}$$

$$P_{E3u_{a_3}} = |P_{3u_{a_3}}| + |P_{t3u_{a_3}}| = |471| + |-389| = 860 \text{ N}$$

$$P_{E4u_{a_3}} = |P_{4u_{a_3}}| + |P_{t4u_{a_3}}| = |471| + |-389| = 860 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentní zátěže během zpomalení ve směru -Z:

$$P_{E1d_{a_3}} = |P_{1d_{a_3}}| + |P_{t1d_{a_3}}| = |441,3| + |257| = 698,5 \text{ N}$$

$$P_{E2d_{a_3}} = |P_{2d_{a_3}}| + |P_{t2d_{a_3}}| = |441,3| + |257| = 698,5 \text{ N}$$

$$P_{E3d_{a_3}} = |P_{3d_{a_3}}| + |P_{t3d_{a_3}}| = |441,3| + |257| = 698,5 \text{ N}$$

$$P_{E4d_{a_3}} = |P_{4d_{a_3}}| + |P_{t4d_{a_3}}| = |441,3| + |257| = 698,5 \text{ N}$$



Výpočet střední zátěže jednotlivých vozíků:

$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{P_{E1u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E1d_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E1}^3 \cdot x_2 + P_{E1d_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{P_{E2u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E2d_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E2}^3 \cdot x_2 + P_{E2d_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{P_{E3u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E3d_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E3}^3 \cdot x_2 + P_{E3d_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{P_{E4u_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4u_{a3}}^3 \cdot x_3 + P_{E4d_{a1}}^3 \cdot x_1 + P_{E4}^3 \cdot x_2 + P_{E4d_{a3}}^3 \cdot x_3}{2 \cdot h}}$$
$$= \sqrt[3]{\frac{698,5^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 860^3 \cdot 0,5 + 860^3 \cdot 0,5 + 456,2^3 \cdot 0,8 + 689,5^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 1,8}}$$
$$= 679,4 \text{ N}$$

Nejvyšší zátěž je na vozík č.1, podle této zátěže se volí lineární vedení pohybové jednotky v ose Z.



Statická a dynamická únosnost vozíků:

$$C_0 = 76\,000 \text{ N}$$

$$C = 32\,750 \text{ N}$$

Statický faktor:

$$f_s = \frac{C_0}{P_{E1da_1}} = \frac{76\,000}{860} = 88,4 [-]$$

Faktor zatížení pro silné rázy a vibrace při rychlostech vyšších 120 m/min

$$f_w = 3 [-]$$

Nominální životnost lineárního vedení:

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}} \right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{32\,750}{3 \cdot 679,4} \right)^3 \cdot 50 = 207\,450 \text{ km}$$

Provozní životnost lineárního vedení:

$$L_{h1} = \frac{L_1 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \frac{L_2 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

$$L_{h3} = \frac{L_3 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$

$$L_{h4} = \frac{L_4 \cdot 1000}{2 \cdot h \cdot 60 \cdot n} = \frac{207\,450 \cdot 1000}{2 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8} = 120\,050 \text{ h}$$



Lineární vedení HGW55HC od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu
120 050 hodin.

Určení vzdáleností pohybové matice:

[12]

Nepodepřená délka hřídel [m] $l_k=1216$ m

Vzdálenost mezi ložisky [m] $l_d=1800$ m

Výpočet kontrolní vzpěrné tuhosti:

$$F_{max} = m \cdot a_1 = 310 \cdot 2 = 620 \text{ N}$$

$$F_k = 2 \cdot F_{max} = 2 \cdot 620 = 1240 \text{ N}$$

Koeficient závislosti na uložení pohybového šroubu:

$$k_k=1,03 \text{ [-]}$$

$$d_k = \sqrt[4]{\frac{F_k \cdot l_k^2}{k_k \cdot 10^5}} = \sqrt[4]{\frac{1240 \cdot 1216^3}{1,03 \cdot 10^5}} = 12 \text{ mm}$$

Průměr hřídele pohybového šroubu dle katalogu:

$$d_{kk}=45,8 \text{ mm}$$

Jmenovitý průměr hřídele pohybového šroubu:

$$d_j=50 \text{ mm}$$

Stoupání pohybového šroubu: $P=10$ mm

Účinnost pohybového šroubu: $\eta=0,88$

Dynamická únosnost pohybového šroubu:

$$C_{dyn}=52\,800 \text{ N}$$



Kontrolní výpočet maximálních otáček:

Koeficient uložení pohybového šroubu:

$$k_d = 1,22$$

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_{kk} \cdot 10^8}{l_d^2} = \frac{1,22 \cdot 45,8 \cdot 10^8}{1800^2} = 1\,725 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{max} = n_k \cdot \eta = 1\,725 \cdot 0,88 = 1\,518 \text{ min}^{-1}$$

Kontrola otáčkového faktoru:

$$\alpha = d_j \cdot n_{max} = 50 \cdot 1\,518 = 75\,881 [-]$$

Maximální dovolený otáčkový faktor $\alpha_{max} = 90\,000 [-]$

Kontrolní životnost pohybového šroubu:

$$n_m = \frac{n_{max} \cdot t_c}{1000} = \frac{1518 \cdot 1,8}{1000} = 21,9 \text{ min}^{-1}$$

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_{max}^3 \cdot t_c}{1000}} = \sqrt[3]{\frac{620^3 \cdot 1,8}{1000}} = 150,8 \text{ N}$$

$$L = \sqrt[3]{\frac{C_{dyn}}{F_m}} = \sqrt[3]{\frac{52800}{150,8}} = 7$$

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n_m \cdot 60} = \frac{7 \cdot 10^6}{21,9 \cdot 60} = 14\,682 \text{ hod}$$

Výpočet hnacího kroutícího momentu:

$$M_k = \frac{F_k \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{1240 \cdot 10}{2000 \cdot \pi \cdot 0,88} = 2,24 \text{ Nm}$$

Pohybový šroub DDB R50-010 od firmy HIWIN vydrží v nepřetržitém provozu 14 682 hodin. Pro kroutící moment 2,24 Nm byl zvolen motor FRMM1K2B513C od firmy HIWIN.