ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

Diplomová práce

Koncepční návrh polohovacího zařízení pro akustickou intenzitní sondu

2019 **Bc. Jan Ferkl**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ferkl** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **438602**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Koncepční návrh polohovacího zařízení pro akustickou intenzitní sondu

Název diplomové práce anglicky:

Conceptual design of positioning device for acoustic intensity probe

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Navrhněte koncepci manipulátoru akustické intenzitní sondy pro účely měření akustických vlastností stavebních strojů. Pro navržené zařízení navrhněte řídící program; Osnova práce: Zpracujte rešerši dostupných polohovacích zařízení použitelných při řešené aplikaci.; Proveďte návrh kinematické struktury jednoúčelového manipulátoru, navrhněte pohony polohovacích os a vyberte vhodný řídicí systém.; Vyberte vhodné komerčně dostupné řešení a porovnejte ho s vlastní koncepcí jednoúčelového manipulátoru.; Zvolte vhodné řešení a navrhněte řídící program manipulace akustické intenzitní sondy.; Hlavní požadované parametry zařízení jsou: nezávislé polohování ve dvou osách, pracovní prostor 3 [m] široký a 2.5 [m] vysoký, rastr měřených pozic o rozteči 100 [mm], přesnost polohování ±2.5 [mm], maximální doba polohování mezi měřenými body 5 [s], hmotnost akustické intenzitní sondy 0.4 [kg].; Zadavatel: Doosan Bobcat EMEA, s. r. o.; Konzultant: Ing. Lukáš Horký; Rozsah textové části: 60 – 80 stran.

Seznam doporučené literatury:

TALÁCKO, Jaroslav. Automatizace výrobních zařízení. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02160-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Novotný, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Lukáš Horký, Doosan Bobcat Engineering s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019** Termín odevzdání diplomové práce: **21.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019

Datum převzetí zadání Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém 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 18.7.2019 …….

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval zadavateli této diplomové práce, firmě Bobcat, za poskytnuté zázemí. Jmenovitě bych si dovolil poděkovat Martinu Šiškovi, Ing. Lukášovi Horkému a Ing. Ivanu Jeřábkovi, Ph.D. V neposlední řadě vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lukáši Novotnému, Ph.D.

Anotační list

Autor:	Bc. Jan Ferkl
Název DP:	Koncepční návrh polohovacího zařízení pro akustickou intenzitní sondu
Rozsah práce:	70 stran
Školní rok vyhotovení:	2018/2019
Škola:	České vysoké učení technické v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí:	Ing. Lukáš Novotný Ph.D.
Konzultant:	Ing. Lukáš Horký
Zadavatel:	Doosan Bobcat EMEA, s. r. o.
Využití:	Automatizace měření akustické intenzity
Klíčová slova:	manipulátor, akustická intenzita, koncepční návrh, automatizace, cRIO
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá automatizací polohování akustické intenzitní sondy pro účely vývoje stavebních strojů. Na základě technického a finančního srovnání možných řešení je jedno zvoleno pro praktický návrh řídícího programu.

Annotation

Author:	Bc. Jan Ferkl
Title of master thesis:	Conceptual design of positioning device for acoustic intensity probe
Extent:	70 pages
Academic year:	2018/2019
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Lukáš Novotný Ph.D.
Consultant:	Ing. Lukáš Horký
Submitter of the Theme:	Doosan Bobcat EMEA, s. r. o.
Application:	Automation of measurement with acoustic intensity probe.
Keywords:	manipulator, acoustic intensity, conceptual design, automation, cRIO
Annotation:	The topic of this master thesis is automation of manipulation of acustic intensity probe for the purpose of development of construction machines. On the basis of technical and financial comparsion of possible solutions is one of them selected for practical design of control software.

Obsah

Seznam použitých zkratek ... 9
1. Úvod ... 11
2. Rešerše ... 12
2.1. Měření akustických veličin v průmyslové praxi ... 12
2.1.1. Současný stav v oblasti akustických měření ve firmě Bobcat ... 13
2.1.2. Rozbor zadaných požadavků na vyvíjené zařízení ... 17
2.1.3. Přehled zařízení určených k analýze polohy a výkonu akustického zdroje ... 17
2.1.4. Akustická kamera ... 18
2.1.5. Polohovací zařízení jednoho či více mikrofonů ... 19
2.1.6. Univerzální polohovací zařízení ... 21
3. Praktická část ... 24
3.1. Rozbor řešení pomocí kolaborativního robotu ... 25
3.1.1. Volba velikosti modelu kolaborativního robotu, návrh rozměrů přípravku ... 25
3.1.2. Verifikace kinematických možností ... 27
3.1.3. Zhodnocení varianty kolaborativní robot ... 27
3.2. Rozbor řešení pomocí jednoúčelového manipulátoru ... 28
3.2.1. Hodnocené parametry kinematických koncepčních řešení ... 28
3.2.2. Výčet kinematických návrhů ... 29
3.2.3. Volba kinematického návrhu a její zdůvodnění ... 34
3.2.4. CAD model vybraného kinematického návrhu ... 35
3.2.5. Návrh pohonů manipulátoru ... 36
3.2.6. Pevnostní kontrola horizontální osy ... 39
3.2.7. Výčet vhodných řídících systémů ... 42
3.2.8. Zhodnocení varianty jednoúčelový manipulátor ... 44
3.2.9. Volba řešení ... 44
3.3. Návrh řídícího systému jednoúčelového manipulátoru ... 44
3.3.1. LabVIEW Real Time, FPGA a SOFTMOTION moduly ... 45
3.3.2. Uvažovaná fyzická konfigurace řízené osy ... 48
3.3.3. Konfigurace Softmotion pohybové osy ... 49
3.3.4. Požadavky na řídící program manipulace ... 50
3.3.5. Stavový diagram řídícího programu ... 50
3.3.6. Paleta VI SOFTMOTION ... 52
3.3.7. Referování a polohování pohybových os ... 54
3.3.8. VI Main a uživatelské rozhraní ... 57
3.4. Problematika bezpečnosti provozu ... 58
3.5. Návrh elektroinstalace manipulátoru ... 61
4. Závěr ... 63
5. Seznamy ... 65
5.1. Citovaná literatura ... 65
5.2. Seznam obrázků ... 69
5.3. Seznam tabulek ... 70
5.4. Seznam příloh ... 70

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
h_i	stoupání
$h_i{}'$	šířka pastorku
E_k	kinetická energie
$I_{C\ red\ rotor\ i}$	redukovaný moment setrvačnosti na rotor
I_i	moment setrvačnosti
M_i	kroutící moment
$M_o(x)$	ohybový moment
m_i	hmotnost
$m_i{}'$	modul ozubení
n_i	otáčky
p_i	převodový poměr
r_i	poloměr pastorku
v_i	posunutí ve směru Y
v_i	rychlost
z_i	počet zubů
ω_i	úhlová rychlost
[°C]	stupeň celsia
[µm]	mikrometr
[A]	ampér
[kg]	kilogram
[km/h]	kilometry za hodinu
[kW]	kilowatt
[m/s]	metry za sekundu
[m]	metr
[mm]	milimetr
[ms]	milisekunda
[Nm]	Newton-metr
[ot]	otáčky
[rad]	radián
[s]	sekunda

a	zrychlení
cRIO	compact reconfigurable input output
DPH	daň z přidané hodnoty
E	Youngův modul pružnosti
F	síla
FPGA	field programmable gate array
J	kvadratický moment průřezu
kč	korun českých
m(x)	ohybový moment od jednotkového účinku síly
NI	National Instrument
PLC	programmable logical controller
q	spojité zatížení nosníku
RMS	root mean square
RT	real time
s	dráha
SIL	safety integrity level
t	čas
VI	virtuál instrument
x	souřadnice
α	úhlové zrychlení
η	účinnost
ρ	hustota
φ	natočení

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou automatizace měření akustickou intenzitní sondou. K tomu je potřeba zajistit automatické polohování se zmíněnou sondou. Stěžejní vstupní parametr návrhu je rovinný pracovní prostor o rozměrech 2,5 [m] výšky a 3 [m] šířky. Zařízení je určeno k akustickým zkouškám menších stavebních strojů, které zadavatel práce, Inovační centrum firmy Bobcat, vyvíjí.

Cílem práce je návrh vhodného řešení manipulace akustické intenzitní sondy a návrh řídícího programu manipulace. K tomu je zapotřebí vypracovat koncepční návrh vlastního jednoúčelového zařízení a dále zhodnotit komerční použitelná zařízení. Koncepční návrh obnáší návrh kinematiky, návrh pohonů a návrh vhodného řídícího systému. Vlastní koncept bude následně srovnán s vybraným komerčně dostupným zařízením. Na základě zhodnocení obou variant bude jedna z nich vybrána pro návrh řídícího programu manipulace.

2. Rešerše

Úvod rešerše je věnován motivaci akustických měření. Jedná se o technickou disciplínu, které vyvíjené zařízení, rovinný manipulátor, slouží jako nástroj automatizace. Dále je popsána současná praxe akustického měření ve firmě Bobcat, jež je zadavatelem práce. Objektivní kritika následně dokládá potřebu již zmíněné automatizace.

V další části rešerše budou představeny stávající řešení ať už ze strany specializovaných výrobců měřící techniky, odborné společnosti nebo ze strany výrobců univerzálních manipulátorů.

2.1. Měření akustických veličin v průmyslové praxi

Mezi základní akustické veličiny patří akustický tlak, tedy tlak způsobený vychýlením částic kontinua vlivem zvukového vlnění (podélného vlnění částic kontinua). Další veličinou je akustický výkon. Jedná se o množství energie vyzářené akustickým zdrojem (zvukového vlnění) za jednotku času. Poslední fyzikální veličina, která bude velmi stručně představena, se nazývá akustická intenzita. Vyjadřuje množství akustického výkonu dopadající na jednotku plochy. [1]

Význam akustických měření tkví především v limitech sluchového ústrojí člověka. Hygienická omezení v podobě norem postihují všechny oblasti lidské činnosti. Z širokého pole uplatnění se tato práce zaměřuje na stavební stroje, na které se zadavatel práce specializuje a které rovněž podléhají normám.

Podstata měření všech akustických veličin vychází ze skutečnosti, že zvuk jsou podélné (ke směru šíření) tlakové vlny. Ať už je výstupem měření akustická intenzita, akustický výkon, frekvenční spektrum nebo analýza polohy zdroje zvuku, základem je vždy měření tlaku. Atmosférický tlak se sčítá s tlakem akustickým, čímž vzniká celkový tlak v daném bodě. Ten měříme pomocí mikrofonu, jehož úkolem je převést tlak na elektrický signál. K tomu se obvykle používá elektromagnetické indukce u elektrodynamických mikrofonů nebo proměnlivé kapacity kondenzátoru u mikrofonů kapacitních. [2]

2.1.1. Současný stav v oblasti akustických měření ve firmě Bobcat

Ve volném akustickém prostředí dochází k pohybu zvukových vln pouze ve směru od zdroje zvuku. Takový prostor je například otevřené prostranství vně budov (letiště). Ve venkovních prostorách je však měření znehodnoceno okolními zdroji zvuku a nestálými vlivy prostředí. [1]

V jiných než volných prostorách nastávají odrazy zvukových vln. Při měření tak na mikrofon dopadají i odražené zvukové vlny, čímž dochází ke znehodnocení měření akustického zdroje. Z toho důvodu je problematické měřit akustický výkon v neupravených vnitřních prostorách. [1]

Obr. 1 Fotografie semi-anechoické komory [3]

Akustická měření stavebních strojů dle norem není nutné provádět v laboratorních podmínkách. Dovoleny jsou rozdílné klimatické podmínky: teplota od -10 [°C] do +35 [°C], vítr do 1 [m/s] (případně do 8 [m/s] při použití ochrany mikrofonu proti větru). Zakázáno je naopak jiný než písčitý nebo pevný povrch země, zakázána je i sněhová pokrývka. [4]

Praktické zkušenosti testovacích inženýrů firmy Bobcat jen dokládají nestálost venkovního prostředí. Proměnlivé výsledky zkoušek pak bránily využití celého rozsahu povolených hodnot měřených veličin. Řešením je polobezodrazová komora, která byla v inovačním centru firmy Bobcat v Dobříši vybudována v roce 2015.

Akustická intenzita prostředí v komoře (bez přítomnosti zdroje zvuku) je pouhých 20 dB. Rozměry komory jsou dostatečně velké, aby se v ní mohly mikrofony rozmístit na plášti pomyslné polokoule o poloměru 10 [m], jak pro měřené stroje vyžadují normy. Velikost polokoule dovoluje zacházet se strojem jako s bodovým zdrojem zvuku. Uprostřed komory se v podlaze nachází „válcová zkušebna“. Jedná se o systém válců s nastavitelným rozvorem, který umožňuje dynamické zkoušky strojů, a to až do rychlosti 80 [km/h]. Významným parametrem při akustickém měření je také teplota okolního vzduchu. Ta určuje rychlost šíření zvuku, ale také vlhkost vzduchu, která ovlivňuje tlumení při šíření zvukových vln. Z toho důvodu je polobezodrazová místnost vybavena výkonnou, ale tichou vzduchotechnikou, která je schopna uchladit zdroj tepla o výkonu až 300 [kW]. [3] Možnost

měřit v certifikovaných laboratorních podmínkách je velkou výhodou pro realizaci následujících zkoušek:

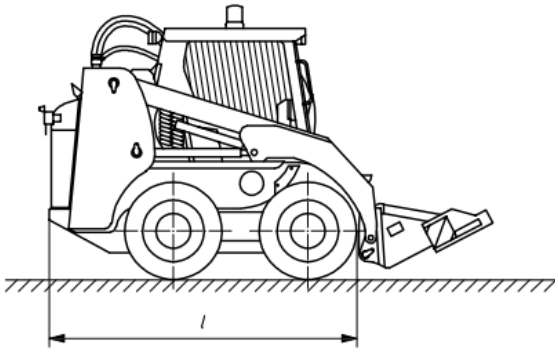
- Měření vnějšího hluku vyzařovaného stroji pro zemní práce – statická zkouška (ISO 6393)
- Měření vnějšího hluku vyzařovaného stroji pro zemní práce – dynamická zkouška (ISO 6395)
- Měření hladiny emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy – statická zkouška (ISO 6394)
- Měření hladiny emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy – dynamická zkouška (ISO 6396)

Obr. 2 Fotografie procedury měření [3]

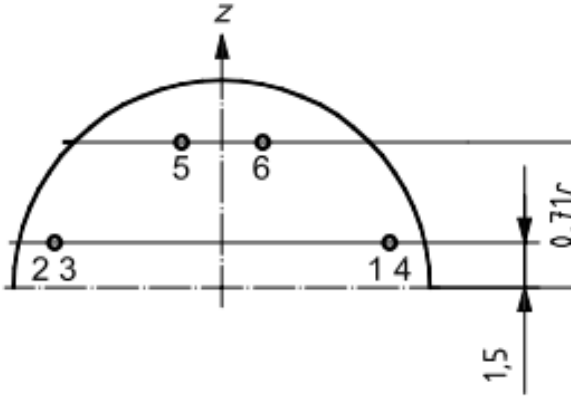
Obr. 3 Fotografie procedury měření [3]

Podstata statického měření spočívá v 15 až 30 sekund trvajícím snímání akustického tlaku nezatíženého stroje, jehož motor běží v otáčkách, které odpovídají maximálnímu výkonu. [4] Dynamická zkouška dle normy probíhá za pohybu stroje po dráze napříč pomyslnou, uzavřenou polokoulí. [5] Při použití válcového systému uvnitř polobezodrazové (semi-anechoické) komory je na válcích stroj pevně ustaven a je nutné zahrnout korekční koeficient zohledňující odlišnost postupu měření (zkouškami byla prokázána minimální odlišnost výsledných hodnot zkoušky). Norma dělí stroje do kategorií, dle kterých se následně určuje parametr „basic length“ (základní délky: viz parametr „l“ Obr. 4 Smykový nakladač, „basic length“). Ta slouží k výpočtu poloměru pomyslné polokoule, na jejímž plášti je v přesně definovaných polohách rozmístěno 6 mikrofonů (Obr. 5). [4] Naměřená data jsou následně ošetřena váhovým filtrem A. Ten zohledňuje skutečnost, že lidské sluchové ústrojí vnímá totožnou intenzitu zvuku o různých frekvencích jako zvukový vjem rozdílné hlasitosti. [6] Měří se také hladina intenzity zvuku okolí, ze které se následně vypočítává korekce. [4] Výsledná data slouží při vývoji stroje. Konstruktéři hledají takové

nastavení pohonů, chladičů a zakrytování, které splňuje normy, a přitom poskytuje maximální výkon stroje.



Obr. 4 Smykový nakladač, „basic length“ [4]



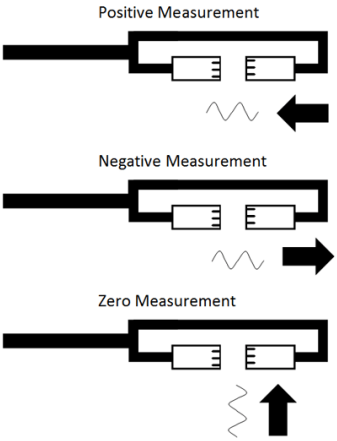
Obr. 5 Rozmístění mikrofonů při zkoušce [4]

Druhý charakteristický test je měření akustického tlaku, který při provozu stroje (statickém i dynamickém) působí na operátora. Statický provoz stroje spočívá v polohování pracovní jednotky stroje a tím simulování podmínek hloubení jámy v zemi. Dynamická zkouška pak obnáší pojezd stroje na válcích v polobezodrazové komoře (praxe ve firmě Bobcat; norma tyto podmínky nevyžaduje). Je stanovena výška operátora, který je při měření vybaven speciálně upravenou bezpečnostní helmou (Obr. 6). Ta je opatřena dvěma mikrofony o přesně definované poloze a orientaci. Sběr dat opět probíhá po dobu 15 až 30 sekund při otáčkách odpovídajících maximálnímu výkonu motoru. Data jsou rovněž ošetřena váhovým filtrem A. [7] [8]

Obr. 6 Helma s mikrofony

Mezi nenormalizovaná měření patří analýza akustického výkonu konkrétních komponent jako jsou hydrogenerátory či kompresory. Dále se měří výkonnost klaksonu a „backup alarm“ (zvuková signalizace doprovázející couvání stroje).

Poslední měření, které bude v této kapitole představeno, je nepřímé měření akustické intenzity. Veličina akustické intenzity je specifická tím, že se jedná o vektor. Má tedy směr díky čemuž je možné analyzovat akustické zdroje, jinak řečeno místa úniku hluku ze stroje. Hledání takových míst je nedílnou součástí návrhu nových konstrukcí stroje, a to nejen stavebních (akustická měření včetně měření akustické intenzity patří mezi zavedené zkoušky i ve Výzkumném centru Ústavu výrobních strojů FS ČVUT). K tomuto měření slouží intenzitní sonda (Obr. 8 Akustická intenzitní sonda), která sestává ze dvou kapacitních mikrofonů. Ty samozřejmě nejsou schopny měřit nic jiného než akustický tlak. Za pomoci přesně definované vzájemné polohy mikrofonů v rámci sondy a přesné orientace sondy v prostoru je však možné ze sady měření určit vektor akustické rychlosti (rychlost pohybu kmitajících hmotných částic). Součin akustického tlaku a akustické rychlosti je hledaná akustická intenzita. Pro zjištění polohy zdroje zvuku je potřeba naměřit více vzorků v definovaných polohách, ideálně v pravidelném rastru. [11]



Obr. 7 Měření akustické intenzity [9]

Obr. 8 Akustická intenzitní sonda [10]

Polohování intenzitní sondy je ve stávající situaci řešeno manuálně: obsluha ručně přikládá sondu do pozic vymezených vlasci napnutými uvnitř rámu (Obr. 9) a zde jí pokud možno stabilně drží po dobu sběru dat. Tento stav je nevhodný z více důvodů, které kopírují přední motivace k automatizaci v průmyslu obecně. Hlavní z nich je lidská chyba, kterou do měření vnáší obsluha sondy. Častým nedostatkem je nízká přesnost pozice sondy, ale i její nepřesná a nestálá orientace v prostoru. Dalším negativem je rychlost polohování. Ta sice při zkoušce, která řádově trvá desítky minut, není časově nejvýznamnějším úkonem, ale projeví se. Za zmínku také stojí diskomfort a časové zatěžování testovacího inženýra a technika.

Obr. 9 Rám s vlasci

Popsaná negativa současného stavu slouží jako motivace k vývoji polohovacího zařízení intenzitní sondy, kterému je věnována tato diplomová práce.

2.1.2. Rozbor zadaných požadavků na vyvíjené zařízení

Tato kapitola je věnována požadavkům kladeným na řešený manipulátor.

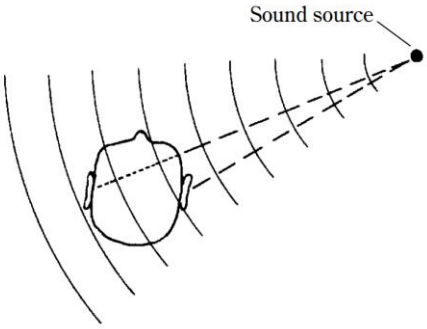
Elementární požadavkem je **nezávislé polohování ve dvou osách** ve svislé rovině, která je situována paralelně k měřenému objektu. Pracovní prostor koncového bodu by měl být dostatečně velký, aby obsáhl promítnutý stavební stroj. Jak již bylo zmíněno, testovací laboratoř, pro kterou je zařízení určeno, je zaměřena na menší stavební stroje. Dle požadavků zadavatele byl tedy pracovní prostor stanoven na **3x2,5 [m]** (šířka x výška). Vzdálenost jednotlivých poloh uvnitř pracovního prostoru je **100 [mm]** (čtvercová mřížka o rozteči 100 [mm]) a koncový bod by na ní měl v nejhorším případě dosahovat přesnosti **±2,5 [mm]**. Čas polohování by neměl překročit 5 [s]. Polohovaná intenzitní sonda od výrobce Brüel & Kjær a je součástí kitu, který nese označení „Brüel & Kjær type 3654“. [12] Významným parametrem je hmotnost sondy **0,4 [kg]**.

Je důležité zmínit podnět ze strany zadavatele, a sice zohlednit při volbě konceptu další možné aplikace. Jmenovitě **měření rychlostního profilu proudu vzduchu v okolí chladiče motoru** stavebního stroje. Tato aplikace neklade zdaleka takové požadavky na velikost pracovního prostoru. Na druhou stranu ale přináší výzvy v podobě tuhosti pohybového řetězce a přesnosti polohování. Za zmínku také stojí poloha chladiče a příslušného otvoru, který se u „skid steer loader“ (smykového nakladače) nachází na obecně orientované rovině kapotáže. To vše je zohledněno při výběru kinematického návrhu manipulátoru.

2.1.3. Přehled zařízení určených k analýze polohy a výkonu akustického zdroje

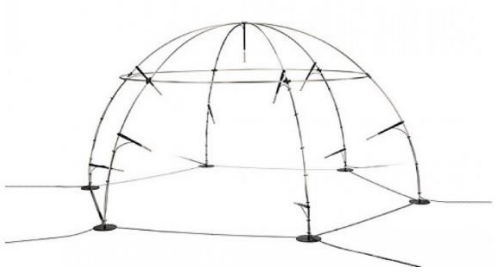
V následujících kapitolách budou představeny konkrétní zařízení sloužící k analýze zvukového pole. Jsou jimi akustické kamery a polohovací zařízení jednoho či více mikrofonů.

Princip určení směru šíření zvukového signálu spočívá v porovnávání dvou (či více) měřených bodů. Na totožném principu funguje i lidské sluchové ústrojí. (Obr. 10) Technická realizace spočívá ve snímání skupiny bodů jedním (u časově ustáleného zvukového pole) nebo více mikrofony (větší počet pevně ustavených mikrofonů umožňuje analyzovat i nestacionární zvuková pole).



Obr. 10 Šíření zvukového vzruchu v prostoru [1]

Jak již bylo zmíněno, sestava dvou vzájemně opačně orientovaných mikrofonů se nazývá akustická intenzitní sonda. Alternativou je akustická kamera neboli rám opatřený větším počtem mikrofonů a (video) kamerou. Takové zařízení pak umožňuje grafické znázornění zvukových vzruchů na videonahrávce snímaného prostoru. K úplnosti výčtu možných přístupů je nutné uvést i pevně rozestavěné mikrofony obklopující bodový akustický zdroj. (Obr. 11) Slouží k určení akustického výkonu, a to i u nestacionárních akustických jevů.

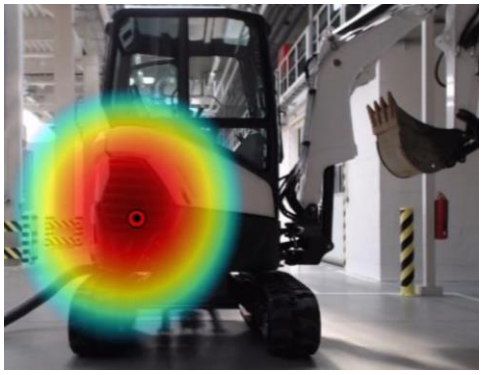


Obr. 11 Rám s mikrofony [13]

2.1.4. Akustická kamera

Vyvíjené zařízení jako hotový produkt není příliš časté. Důvodem jsou nové progresivní metody analyzování polohy akustického zdroje, především pak již uvedené akustické kamery. (Obr. 12)

Obr. 12 Akustická kamera [14]



Obr. 13 Výsledek měření stavebního stroje

Technologie akustické kamery byla v pracovišti zadavatele projektu testována (Obr. 13), ale neosvědčila se jak vhodné řešení. Výrazně méně nákladný software pro

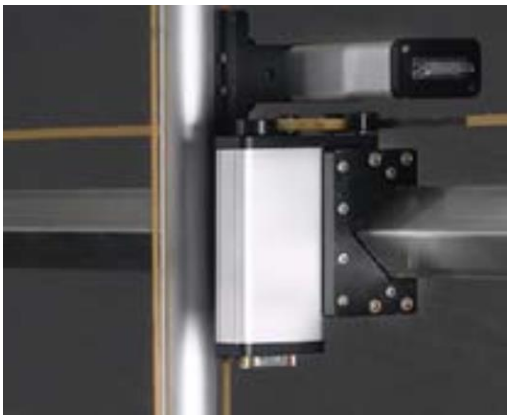
vyhodnocení naměřených dat se u intenzitní sondy stal stěžejním argumentem pro použití tohoto zařízení. Skutečnost, že se intenzitní sonda nehodí pro časově proměnlivá akustická pole se u měření zvukově izolačních schopností kapotáže neprojeví.

Akustické kamery se vyrábí v rozlišných kompozicích mikrofonů i velikostech. Z důvodu výrazné odlišnosti konstrukce zařízení od řešeného zadání jim však nebude věnována v rámci této práce bližší pozornost.

2.1.5. Polohovací zařízení jednoho či více mikrofonů

Rovinný manipulátor výrobce BRÜEL & KJÆR, který za použití ozubených řemenů polohuje pole mikrofonů v kartézských souřadnicích, odpovídá povahou řešené aplikaci. (Obr. 14) Rám se skládá z čtvercových profilů. Za povšimnutí stojí jejich orientace vůči měřené rovině. Rovnoběžné uspořádání by znamenalo odraz zvukových vln zpět k snímačům. Vhodným natočením (o 45° od rovnoběžné pozice) je docíleno snížení vlivu odražených zvukových vln na výsledky měření (Obr. 15). Zařízení je modulární – nemá pevně stanovené rozměrové parametry. Ty se upravují dle požadavků zákazníka. [15]

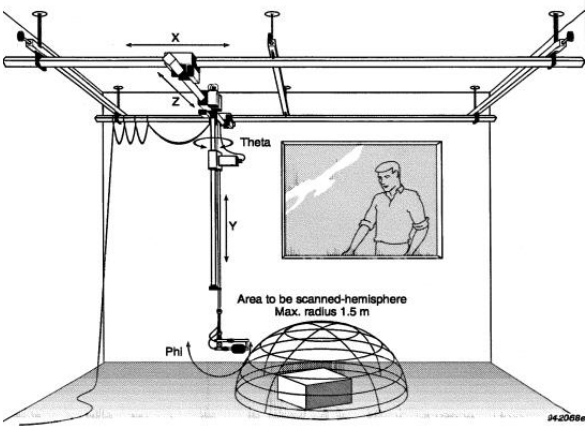
Obr. 14 Manipulátor BRÜEL & KJÆR [15]



Obr. 15 Detail manipulátoru BRÜEL & KJÆR [15]

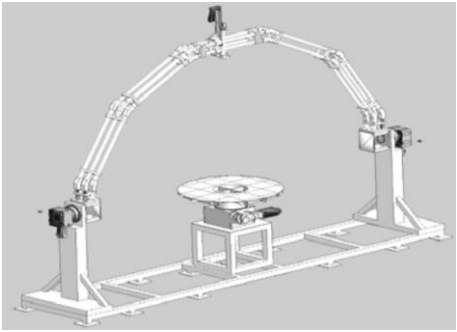
Následující manipulátory slouží k polohování mikrofonu na pomyslné ploše polokoule, uvnitř které se nachází akustický zdroj. Měří se tedy emitovaný akustický výkon stacionárního pole. Nikoliv jeho poloha (ta je již známá: střed zmíněné polokoule). [16]

Pětiosý polohovací systém manipulátoru „type 9664“ od výrobce BRÜEL & KJÆR je jediné komerční řešení, které je schopno polohovat v trojrozměrném prostoru. (Obr. 16) Tři posuvné a dvě rotační osy umožňují koncovým bodem vytvořit plochu polokoule, a navíc mikrofon natočit do směru normály v každé poloze. Opět se jedná o modulární systém vyráběný dle požadavků zákazníka. [16]



Obr. 16 Pětiosý manipulátor výrobce BRÜEL & KJÆR [16]

Následující polohovací zařízení jsou zajímavá především kinematickým konceptem. Nápadité řešení představuje rotační rám, schopný vytvořit půlkruhovou trajektorii mikrofonu. (Obr. 17) Ve středu půlkruhu je situován rotační stůl určený akustickému zdroji. Rozložit pohybové osy mezi nosnou konstrukci mikrofonu a vyšetřovaný zdroj hluku je sice nápadité, ale pro aplikaci stavebních strojů nepoužitelné. Bylo by nutné rotační pohyb realizovat rámem (který nese mikrofony), čímž by se výrazně navýšila náročnost konstrukce. Případně zhotovit otočný stůl schopný rotovat se stavebním strojem. [17]

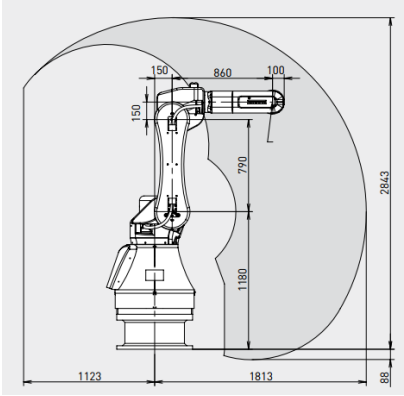

Obr. 17 Manipulátor snímače určený pro provoz v anechoické komoře [17]

Další podobné zařízení je opět vybaveno rotačním stolem. Pohyb po oblouku je však řešen pomocí dvou posuvných os na šikmém rameni, jež je určeno k montáži na svislou stěnu anechoické komory. (Obr. 18) Přínosem poněkud netypické konstrukce rámu je velký pracovní prostor koncového bodu, a tedy nastavitelný poloměr měřené plochy. Tato přednost se u vyvíjeného zařízení neprojeví, a celý koncept tak pro řešené použití ztrácí smysl. [18]

Obr. 18 Manipulátor snímače určený pro provoz v anechoické komoře [18]

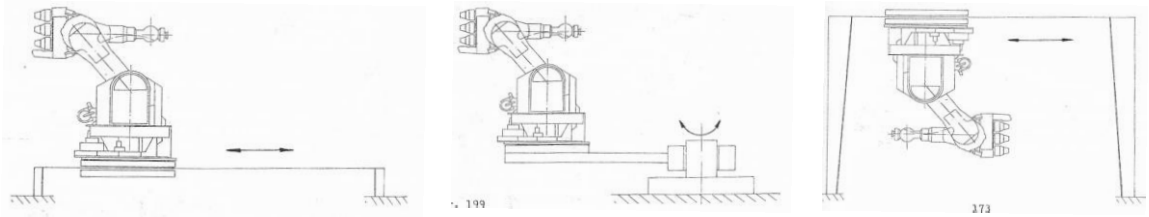
2.1.6. Univerzální polohovací zařízení

Tato kapitola je věnována komerčně dostupným manipulátorům a robotům, které nejsou určeny přímo k použití při měření akustických veličin, ale je možné je k tomuto účelu využít. Jedná se o univerzální zařízení určená k manipulování zpravidla těžšími břemeny, než je měřící aparatura. Požadavky na velký pracovní prostor navíc mnohdy splňují pouze největší modelové řady (například kooperativních robotů firmy Fanuc). Ty jsou ovšem určeny pro zátěže až 35 [kg] a tomu odpovídá i mohutnost konstrukce (Obr. 19). [20]



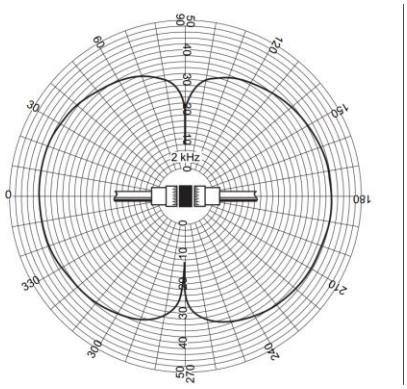
Obr. 19 Fanuc CR-35iA [19]

Tento problém je možné řešit pomocí instalace na „transportní moduly“ (Obr. 20). [21] Ty umožňují polohování celého robotu v prostoru. V průmyslové praxi se používají následující druhy modulů:



Obr. 20 Lineární podlahový, rotační a portálový modul [21]

Průmyslové roboty představují přinejmenším těžkopádné řešení. Alternativní přístup představuje použití výrazně kompaktnějšího kolaborativního robotu, který robustností konstrukce odpovídá řešené aplikaci, ale sám o sobě nesplňuje požadavky na velikost pracovního prostoru. Tento nedostatek by byl řešen dlouhým přípravkem, který by nahrazoval pracovní jednotku robotu a na jehož konci by se nacházela intenzitní sonda. Při polohování snímače je důležitá pozice a kolmost osy intenzitní sondy k měřené rovině (Obr. 22). Nezáleží však na rotaci kolem vlastní osy, čehož by se dalo využít při výše zmíněném řešení kinematiky. Z úlohy polohování by se stala rovinný problém. Bližší rozbor popsaného přístupu se nachází v praktické části této diplomové práce.



Obr. 22 Směrová charakteristika intenzitní sondy [23]

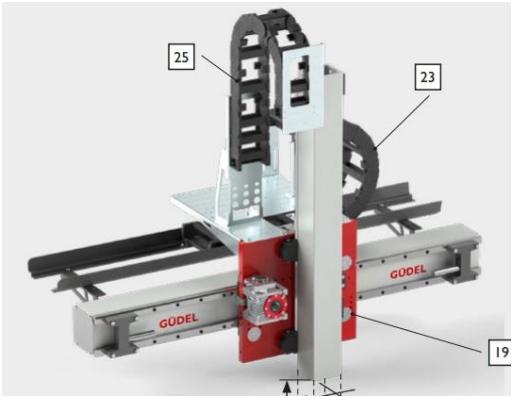
Další variantu představují scara manipulátory opatřeny vertikální osou. Popsán bude model SC0410 od výrobce Neoditech. (Obr. 21) Toto řešení je, podobně jako kooperativní roboty, přinejmenším těžkopádné. Nevyužije se možnost polohování v trojrozměrném prostoru, ani nosnost 50 [kg]. Pracovní prostor navíc zdaleka neodpovídá požadavkům. [22]

Obr. 21 Scara robot [22]

Lineární osy skládající se z nosného profilu, (valivého/lineárního) vedení a ústrojí převodu rotačního pohybu pohonu na lineární pohyb (ozubený řemen, hřeben a pastorek, pohybový nebo kuličkový šroub) budou představeny v kapitole věnované rešerši komponent (příloha diplomové práce). Za zmínku stojí „pick-and-place“ manipulátory od výrobce Wittmann, které se rozměry alespoň řádově blíží. (Obr. 23) Jsou určeny k odebírání plastových výrobků z formy vstřikovacího lisu a odkládání na přilehlé dopravníky. Nemají samostatně stojící rám. Nosnosti se pohybují do několika desítek kilogramů. [24] Jako další lze uvést zařízení „ZP“ od výrobce Güdel. (Obr. 24) Jedná se sériově řazené lineární osy, které jsou vybaveny ozubeným hřebenem a pastorkem.

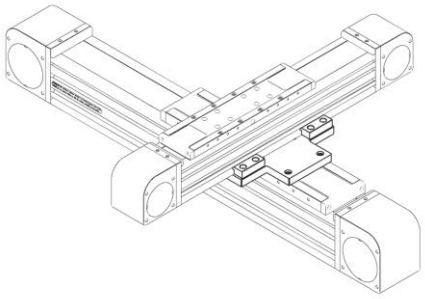
Zdvih ve svislé ose bohužel ani zdaleka nesplňuje kladené požadavky. Je určen pro „pick-and-place“ bez požadavku velkého zdvihu. [25]

Obr. 23 Pick and place manipulátor [24]



Obr. 24 Pick and place manipulátor [25]

Sériově řazené lineární osy představují řešení povahově velmi blízké hledanému zařízení. Významný je především způsob spojení dvou lineárních os. V případě výše uvedených manipulátorů je polohována celá svislá lineární osa (včetně vedení). Jedná se tedy o spoj dvou os vozíkem na vozík. Výrobce Camozzi ve svém katalogu nabízí řadu přípravků, které umožňují sériové řazení dvou os způsobem osa na vozík. (Obr. 25) Tak je umožněno ve svislém směru polohovat pouze vozík nikoliv celou osu. To snižuje nároky na pohony a prostor pro provoz zařízení. [26]



Obr. 25 Sériově řazené lineární osy [26]

3. Praktická část

V rešerši byla představena akustika jako jedna z disciplín testování stavebních strojů. Dále byla představena praxe v Inovačním Centru Bobcat. Z kritiky současného stavu práce s akustickou intenzitní sondou vyplynula motivace k návrhu rovinného manipulačního zařízení, což je tématem této diplomové práce. Následně rešerše pokračovala zanalyzováním komerčně dostupných zařízení, které vedle vývoje vlastního jednoúčelového manipulátoru představují alternativní přístup.

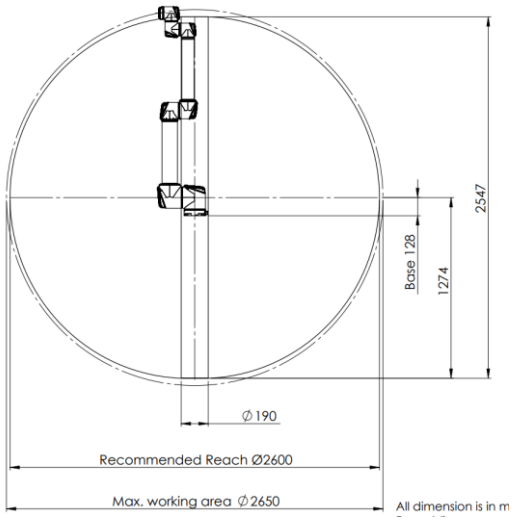
Praktická část této diplomové práce opouští teoretický přístup. Nejprve je blíže vyšetřeno řešení pomocí kolaborativního robotu a to tak, aby jej bylo možné přímo srovnat s vlastním manipulátorem. Je nutné provést výběr modelu a návrh přípravku pro zvětšení pracovního prostoru. Následně jsou verifikovány kinematické možnosti uvedené sestavy.

Druhý způsob řešení je návrh vlastního jednoúčelového manipulátoru. Návrh začíná výčtem možných kinematických struktur a jejich zhodnocením, z čehož vyplývá výběr nejvhodnější varianty a zdůvodnění. Následuje návrh pohonů, řídícího systému a nosné struktury.

Výše popsané přístupy jsou následně porovnány jak z technického, tak z finančního hlediska. Získané závěry jsou předloženy zadavateli práce, který rozhoduje o dalším postupu.

3.1. Rozbor řešení pomocí kolaborativního robotu

Kolaborativní robot je průmyslové zařízení určené k provozu v bezprostřední blízkosti člověka. Oproti standardním robotům se liší omezenou rychlostí a silou pohybů, dále tvarem, který je uzpůsoben tak, aby při kontaktu s operátorem vznikal co nejmenší tlak, a v neposlední řadě i bezpečnostními prvky. Jedním z předních výrobců kolaborativních robotů je firma Universal Robots, jejichž nabídka bude předmětem následujících kapitol.



Obr. 26 Pracovní prostor kolaborativního robotu UR10 [27]

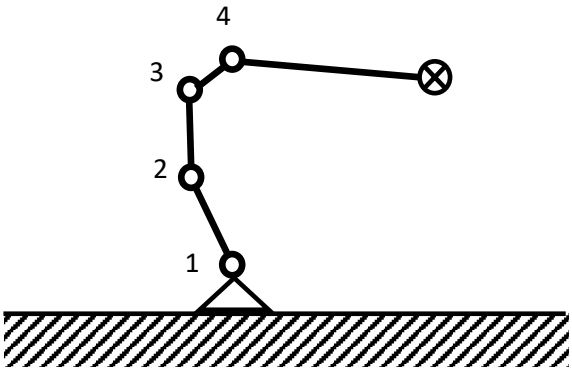
3.1.1. Volba velikosti modelu kolaborativního robotu, návrh rozměrů přípravku

Největší nabízený model nese označení UR10. (Obr. 26) Pracovní prostor samotného ramene robotu má tvar koule o průměru 2 600 [mm], což je pro splnění požadavků měření akustickou intenzitní sondou nedostatečné. Navýšení rozměrů pracovního prostoru je možné docílit dlouhým přípravkem (tvaru tyče), který by na jednom konci byl upnut na konci ramene robotu místo pracovní jednotky a na druhém konci by byla připevněna intenzitní sonda.

Významnou vlastností práce s akustickou intenzitní sondou je nezávislost měření na natočení kolem své osy (osy na které leží dvojice mikrofonů). Požadavky polohování jsou tedy pozice v prostoru a kolmost zmíněné osy na měřenou rovinu. Tato skutečnost umožňuje použít výše zmíněný princip zvětšení pracovního prostoru bez použití přídavné rotační osy na konci přípravku.

Kolaborativní robot se skládá ze sériově řazených rotačních vazeb. Požadavek kolmosti osy intenzitní sondy na měřenou rovinu je splněn pouze při polohování v těch rotačních osách, jejichž osa rotace je na měřenou rovinu kolmá. Tato skutečnost je patrná z Obr. 27 Pohybové osy UR10 . Z řešení kinematiky se tím pádem stává rovinná úloha (Obr. 28), což výrazně zjednodušuje ověření možných poloh koncového bodu.

Obr. 27 Pohybové osy UR10 [28]



Obr. 28 Rovinné kinematické schéma s očíslovanými osami

Měřící sonda umístěna na konci řešeného přípravku má hmotnost 0,4 [kg]. Jedná se tedy o velmi malé zatížení, které při omezení zrychlení pohybů nepředstavuje riziko při dodržování dovolených zatížení robotu. Z pohledu zatížení je však žádoucí, aby přípravek nebyl zbytečně dlouhý. Dále je požadována možnost polohovat koncový bod do polohy osy číslo 1. Z toho opět plyne omezení maximální délky přípravku, a to na vzdálenost mezi osou číslo 1 a 4 při nataženém stavu (ramena v jedné přímce).

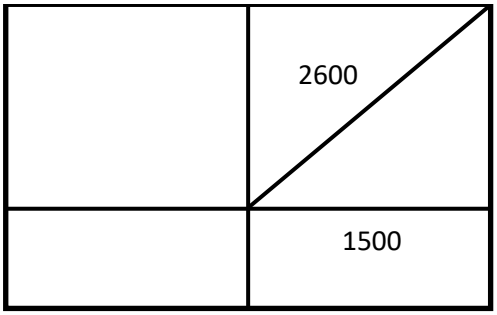
Co nejmenší potřebná délka přípravku pro pokrytí celého pracovního prostoru je dosahována při poloze osy číslo 1 ve svislé ose symetrie pracovního prostoru. Následně je potřeba určit polohu první používané rotační osy ve svislém směru. Z výše popsaných omezení délky přípravku je maximální přípustná hodnota rovna vzdálenosti mezi osou číslo 1 a 4 při maximálně nataženém stavu. Tato hodnota pro největší model UR10 je rovna 1 300 [mm]. Při uvažování této hodnoty pro další výpočty je maximální dosažitelná vzdálenost (poloměr pracovního prostoru) od první používané rotační osy rovna 2 600 [mm]. Poloha robotu ve svislém směru pak vychází z Pythagorovy věty (Obr. 29):

Pro model UR10:

$$\sqrt{2600^2 - 1500^2} = 2124\ [mm] \qquad \textit{Rov. 1}$$

Při použití menšího modelu kolaborativního robotu UR5 vypadá rovnice následovně:

$$\sqrt{1700^2 - 1500^2} = 800\ [mm] \qquad \textit{Rov. 2}$$



Obr. 29 Pracovní prostor (UR10) s rozměry pro výpočet polohy osy číslo 1

Výsledek při uvažování modelu UR5 však znamená, že aby bylo možné polohovat koncový bod do horního rohu pracovního prostoru, musí být osa číslo 1 v horní polorovině

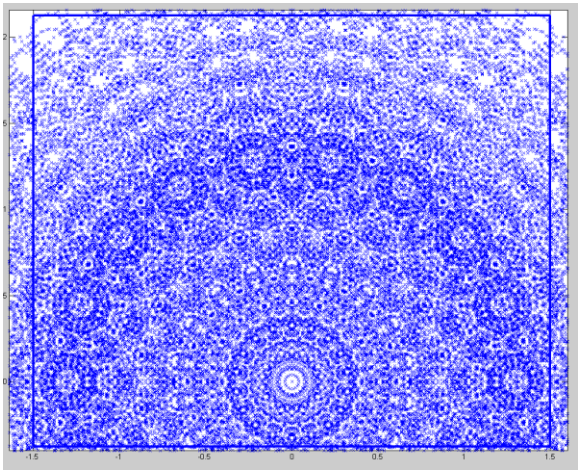
pracovního prostoru. Z toho vychází, že by ovšem nebyly dosažitelné krajní polohy v dolní polorovině pracovního prostoru. Právě uvedená úvaha je důkazem, že velikost ramen robotu UR5 je nedostatečná pro práci v celém pracovním prostoru.

Tím je známá potřebná velikost robotu, poloha celého zařízení ve vztahu k pracovnímu prostoru a také potřebná délka přípravku pro jeho celé obsloužení.

3.1.2. Verifikace kinematických možností

Návrh polohového uspořádání a rozměrů vychází z dosažitelnosti „nejbližších“ a „nejvzdálenějších“ poloh pracovního prostoru (od osy číslo 1). Takové uspořádání však ještě samo o sobě nezajišťuje polohovatelnost koncového bodu po celém pracovním prostoru. Z toho důvodu byla naprogramováno vykreslení pozic koncového bodu v programu Matlab při všech kombinacích poloh jednotlivých používaných rotačních os, a to při zvoleném inkrementu polohy 20°. Tento program je přílohou této diplomové práce.

Z grafického výstupu (Obr. 30) je patrné, že se v pracovním prostoru nevyskytují výrazně problematická místa. Nerovnoměrné rozložení pozic koncového bodu je způsobeno dosažitelností „nejvzdálenějších“ a „nejbližších“ poloh jen při velmi specifických natočeních jednotlivých rotačních os a také konečnou velikostí inkrementu natočení vykreslovaných poloh jednotlivých os.



Obr. 30 Pracovní prostor s vykreslenými možnými pozicemi koncového bodu

Závěr simulace je tedy takový, že robot s přípravkem o navrhovaných prostorových dispozicích je schopen polohovat v celém požadovaném pracovním prostoru.

3.1.3. Zhodnocení varianty kolaborativní robot

Pořízení kolaborativního robotu představuje poměrně ucelené, a především univerzální řešení, které by na pracovišti zadavatele diplomové práce našlo mimo měření intenzitní sondou i další uplatnění (například již zmíněné měření rychlostního profilu toku vzduchu v blízkosti chladiče stavebního stroje). Bezpečnost provozu a elektroinstalace je již vyřešena

ze strany výrobce Universal Robots. Naopak by bylo nutné zkonstruovat přípravek pro uchycení intenzitní sondy, základnu pro ukotvení robotu a naprogramovat řízení.

Byla navázána komunikace s českou distribucí, firmou DREAMland, spol. s r.o., která vyspecifikovaný model **UR10 nabízí za 768 000 kč bez DPH**. Jak je uvedeno v následujících kapitolách, jedná se o finančně výrazně náročnější variantu přístupu, která vyniká především svou univerzálností a hmotností (29 [kg]).

3.2. Rozbor řešení pomocí jednoúčelového manipulátoru

Alternativní přístup představuje jednoúčelový manipulátor vlastní výroby, který by svými parametry odpovídal požadovaným vlastnostem hledaného zařízení. V první řadě je potřeba zhodnotit možné kinematické struktury a následně jednu vybrat pro bližší rozbor. Dále je potřeba navrhnout pohony pohyblivých os. Tato problematika zahrnuje rešerši na trhu nabízených komponent (příloha diplomové práce) a návrh krokových motorů. Následuje pevnostní kontrola a zhodnocení použitelných řídících systémů. Právě uvedené statě následně utváří finanční náročnost tohoto řešení.

3.2.1. Hodnocené parametry kinematických koncepčních řešení

Tato kapitola je věnována představení možných kinematických uspořádání vlastního (vyvíjeného) zařízení, komentáři základních vlastností a zhodnocení vybraných parametrů.

Na jednotlivých koncepčních řešení budou zhodnoceny následující parametry:

- **Náročnost konstrukce** (Zadavatel práce preferuje nákup hotových komponent před vlastní výrobou. Důvodem je vytíženost pracoviště prototypové dílny, kde se řeší kusová strojní výroba.)
- **Náročnost řízení** (Je obecně žádoucí, aby polohování koncového bodu manipulátoru nebylo zbytečně výpočetně komplikované.)
- **Velikost plochy** konstrukce v normálovém směru měřené roviny (Jedná se o plochu, od které se zvukové vlny odrážejí zpátky k intenzitní sondě. Negativní efekt při značné mohutnosti konstrukce lze redukovat pomocí orientace povrchových ploch. Ne však zcela eliminovat. Z toho důvodu je toto kritérium rovněž zohledněno.)

- **Přesnost** polohování (Požadovaná přesnost polohování v této aplikaci nepředstavuje velké úskalí. Obecně je ale vhodné cílit na co pokud možná největší opakovatelnost a přesnost polohování.)
- **Využitelnost při měření airflow** (Jak již bylo uvedeno, jeden z podnětů ze strany zadavatele práce je využitelnost nabytých zkušeností při vývoji podobného manipulátoru, určeného k měření rychlostního profilu toku vzduchu v blízkosti chladiče stavebního stroje. Taková aplikaci klade důraz na přesnost a tuhost. Naopak snižuje požadavky na velikost pracovního prostoru.)
- **Bezpečnost** (Problematikou bezpečnosti je řešena interně s bezpečnostním technikem závodu a také je přiblížena v dedikované kapitole. Tento parametr slouží pouze jako velmi stručné zhodnocení: množství pohyblivých komponent, povaha pohybu případně i hrozícího kontaktu s okolím manipulátoru.)

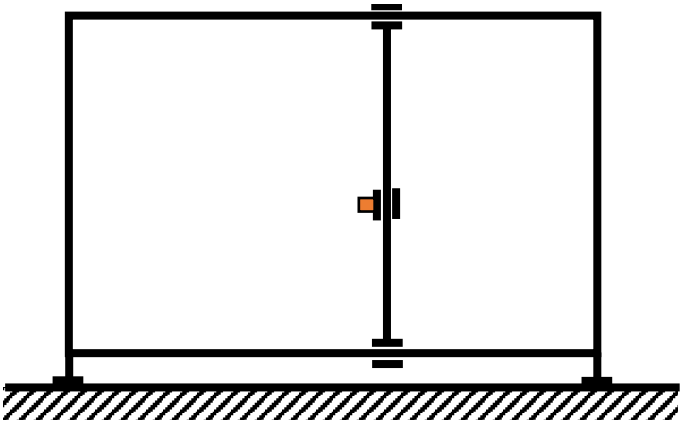
Jednotlivé parametry budou hodnoceny relativně, ve vztahu k dalším konceptům:

- **+** znamená pozitivní hodnocení
- **=** znamená průměrné hodnocení
- **-** znamená negativní hodnocení

3.2.2. Výčet kinematických návrhů

1. Manipulátor v kartézských souřadnicích #1

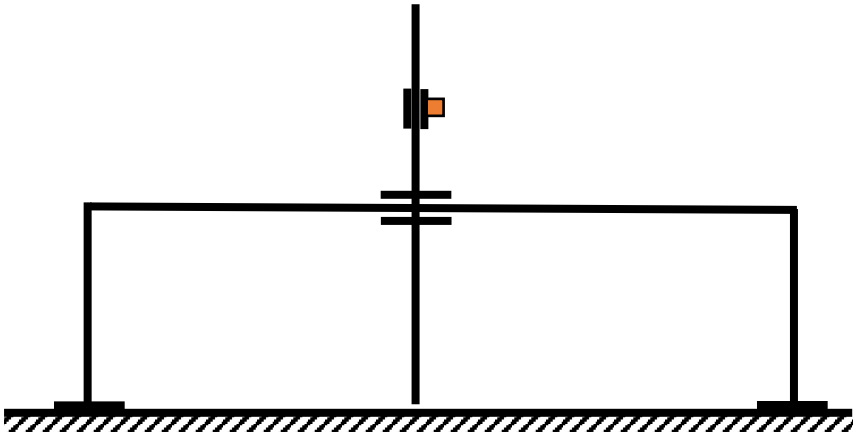
První kinematický návrh je obdoba již zmiňovaného manipulátoru od výrobce BRÜEL & KJÆR. Výsledný pohyb se skládá ze dvou navzájem kolmých posuvných vazeb. Jednotlivé pohybové osy jsou shodné s osami kartézského souřadného systému, což je významné zjednodušení řídícího programu. Z hlediska bezpečnosti tato koncepce nikterak nevyčnívá: zařízení je poměrně ucelené, ale hrozí sevření části těla operátora mezi pohybující se části (takový typ kontaktu je normou ISO 15066 (bezpečnostní omezení kolaborativních robotů) omezován výrazně více než prostý náraz.). Tento návrh nepatří ke kompaktním řešením. Z toho důvodu byl ohodnocen jako nevhodný pro další použití při jiných měření.



Obr. 31 Manipulátor v kartézských souřadnicích #1

2. Manipulátor v kartézských souřadnicích #2

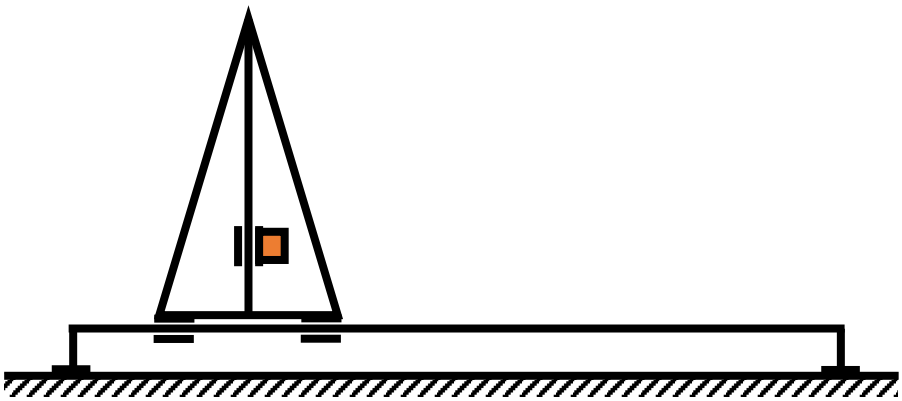
Kompaktnější alternativu představuje koncepce, kdy je dvojice lineárních os situována „do kříže“. Vodorovná osa je pomocí stojanů v polovině pracovního prostoru a slouží k polohování svislé osy. Tato konstrukce snižuje riziko kontaktu typu sevření, přičemž zachovává veškeré výhody polohování v osách shodných s kartézským souřadným systémem.



Obr. 32 Manipulátor v kartézských souřadnicích #2

3. Manipulátor v kartézských souřadnicích #3

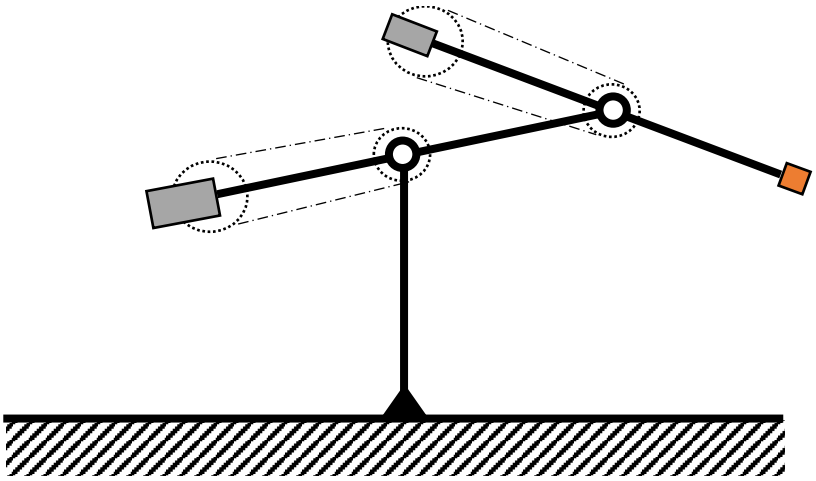
Další koncept založený na pohybu v kartézských souřadnicích je inspirován konstrukcí stojanu horizontální frézky. Horizontálně pojízdný stojan opatřený svislou osou poskytuje dostatečnou tuhost. Při splnění požadavku velkého pracovního prostoru by bylo potřeba dvou paralelních kolejnic. To je komplikace pro další aplikace, kdy není zaručena možnost pojezd ustavit na pevný podklad. Stojan by mohl být svařen z tenkých profilů, čímž by se se snížil vliv na vyšetřované akustické vlnění.



Obr. 33 Manipulátor v kartézských souřadnicích #3

4. Sériově řazené rotační vazby

Zcela opačný přístup představuje skládání dvou rotačních pohybů. Pohony lze při této koncepci situovat do protiváhy se zátěží příslušného ramene, čímž výrazně snížit požadovaný kroutící moment pohonů. Jedná se ale o poměrně komplikovanou konstrukci i řízení pohybů. Z bezpečnostního hlediska se jedná také o poměrně nevhodné řešení. Příčinou je velké množství pohybujících se ramen. Výzvu představuje také přesnost polohování – i při malé úhlové chybě se na přibližně metrových ramenech projeví výrazná nepřesnost polohy.

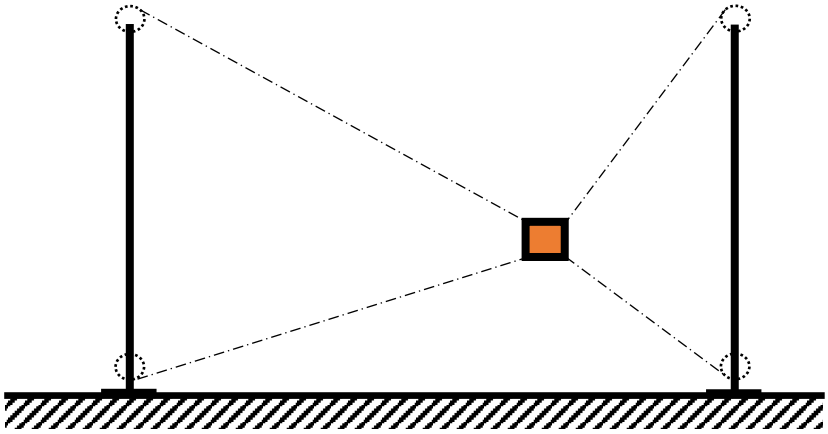


Obr. 34 Sériově řazené rotační vazby

5. Paralelně řazená lana

Další alternativou je série dvou nebo čtyř lan, které se simultánně navíjejí a povolují, čímž dochází k výslednému pohybu. Výhodou je velká modularita systému a malá velikost plochy v normálovém směru. Výzvu představuje řízení a velmi špatně řešitelný problém je

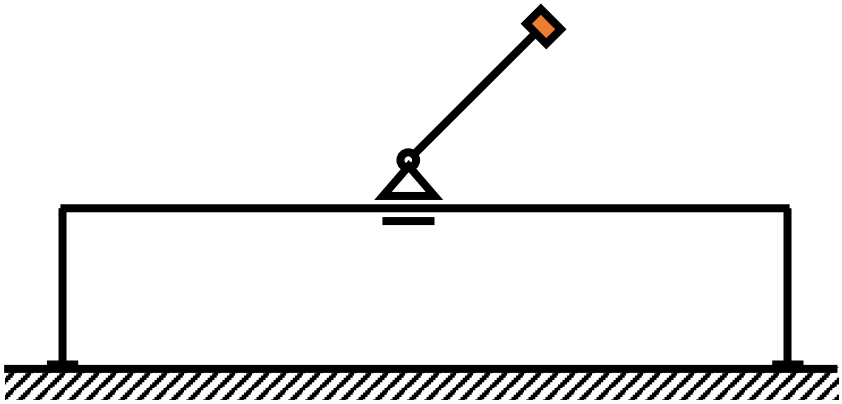
náchylnost k pohybu v normálovém směru k měřené ploše, což z této konstrukce činí velmi nevhodnou pro další aplikace.



Obr. 35 Paralelně řazená lana

6. Kombinace lineárního a rotačního pohybu

Poslední z kinematických návrhů se skládá z posuvného pohybu v horizontálním směru a rotačního pohybu ramene s pracovním bodem na konci. Přítomnost rotačního pohybu mírně ztěžuje řízení pohybů a také zvyšuje náročnost správného vedení kabeláže do koncového bodu. Výrazně zkrácený poloměr rotace oproti variantě 3 snižuje nároky na přesnost polohování jednotlivých kloubů. Z hlediska bezpečnosti a velikosti normálové plochy se tato koncepce řadí k nadprůměrným. Při změně ustavení lineární osy se jedná o vhodný přístup k dalším aplikacím.

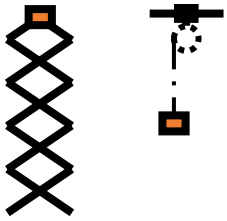


Obr. 36 Kombinace lineárního a rotačního pohybu

7. Alternativní principy lineárního pohybu

Poslední položkou jsou netradiční způsoby, jak realizovat lineární pohyb. První z nich je nůžkový mechanismus. K rozevření a sevření celého mechanismu stačí silově působit pouze na jeden z členů mechanismu. Jsou však přítomny vysoké silové požadavky. Z toho

důvodu jsou nůžkové mechanismy často poháněny hydraulikou (aktuátor je hydraulický válec). Druhý zde uvedený způsob je prosté spouštění koncového bodu na laně, a to za pomoci navijáku. Tento způsob polohování je jednoduchý, ale poloha i orientace koncového bodu v prostoru je z důvodu poddajnosti lana poměrně nejistá.



Obr. 37 Alternativní principy lineárního pohybu

3.2.3. Volba kinematického návrhu a její zdůvodnění

Tab. 1 Zhodnocení kinematických konceptů

	Manipulátor v kartézských souřadnicích #1	Manipulátor v kartézských souřadnicích #2	Manipulátor v kartézských souřadnicích #3	Sériově řazené rotační vazby	Paralelně řazená lana	Kombinace lineárního a rotačního pohybu
konstrukce	=	+	-	-	+	-
řízení	+	+	+	-	-	-
bezpečnost	=	+	+	-	-	+
plocha v normálovém směru	=	+	=	+	+	+
přesnost polohování	+	+	+	-	-	+
využitelnost pro měření airflow	-	+	-	=	-	+

Na základě uvedeného srovnání kinematických konceptů byly následující varianty shledány vhodnými pro řešenou situaci:

Manipulátor v kartézských souřadnicích #1, #2, #3 (dále už jen #1, #2, #3)

Není náhodou, že se do tohoto výběru dostaly pouze koncepce, které výsledný pohyb skládají z posuvných pohybů. Rotační kloub nevyhnutelně přináší úskalí v oblasti konstrukce, řízení, vedení kabeláže a přesnosti polohování. Vyřazovací metodou bylo dále zvoleno jedno řešení pro praktickou část této diplomové práce:

Varianta #3 (Pojízdný stojan se svislou osou) by přinášela nutnost použití dvou paralelních kolejnic, po kterých by se stojan pohyboval. To výrazně zvyšuje nároky na konstrukci a snižuje použitelnost v dalších aplikacích. Varianta #2 naopak umožňuje obě lineární osy z velké části realizovat pomocí nakupovaných součástí. Tím zásadně klesají nároky vlastní konstrukce, což je z pohledu zadavatele práce žádoucí. Snižují se tím požadavky směrem k Prototypové dílně (pracoviště, kde je v inovačním centru firmy Bobcat realizována kusová výroba). Díky tomu byla varianta #2 shledána vhodnější než varianta #1.

Na základě výše popsaných úvah byla po konzultaci se zadavatelem práce vybrána varianta Manipulátor v kartézských souřadnicích #2.

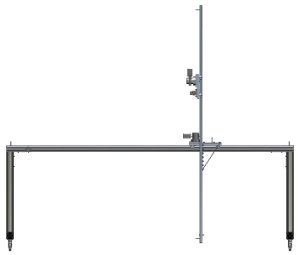
3.2.4. CAD model vybraného kinematického návrhu

Konstrukce a vypracování výrobní dokumentace není předmětem této diplomové práce. Pro bližší řešení návrhu zařízení je však nutná konkrétní představa o podobě zařízení. Z toho důvodu byl vypracován CAD model zařízení (Obr. 38) v programu Siemens NX 10, který je přílohou této diplomové práce.

Na základě diskuse se zadavatelem práce byla značná část konstrukce sestavena z profilů ze slitiny hliníku od firmy Alutec K&K. Jedná se o modulární řešení, které se vyznačuje svou univerzalitou. Tento přístup představuje alternativu k svařovaným jäklovým konstrukcím. Hlavní výhodou zmíněných profilů je skutečnost, že není nutné konstrukci svářet. Hliníkové profily tak kladou nižší požadavky na náročnost práce a manipulace. Díky tomu se těší velké oblibě. Hlavní nevýhodou je relativně nízký osový kvadratický moment průřezu profilu, což při materiálových vlastnostech používané slitiny hliníku (Youngův modul pružnosti $E = 70\,000\ [\frac{N}{mm^2}]$ [29]) zapříčiňuje poddajnost profilů. O této problematice pojednává kapitola věnovaná pevnostním výpočtům. CAD model představen v této kapitole slouží jako výchozí bod analytické pevnostní kontroly.

Obr. 38 CAD model manipulátoru

Vedle zhotovení konkrétní podoby zařízení a stanovení vstupů pro pevnostní výpočet je CAD model důležitý i pro stanovení pohyblivých hmot v obou pohybových osách. Jejich znalost je důležitá při dimenzování pohonů.



Obr. 39 CAD model manipulátoru

Dalším významným konstrukčním prvkem je lineární pohybová osa (horizontální a vertikální). Z důvodu finanční náročnosti (univerzálního) řešení pomocí kolaborativního robotu bylo k (jednoúčelové) variantě přistupováno jako k řešení, které bude vynikat především nižšími náklady na realizaci. Tento přístup je zásadní především při výběru lineární pohybové osy.

V příloze DP byla zhodnocena současná situace na trhu lineárních pohybových os, které svým zdvihem splňují požadované rozměry. Velmi zásadním parametrem se ukázala být cena vybraných komponent. Řešení od firem Festo a Bosch Rexroth začínaly cenou přibližně na 150 000 kč bez DPH za jednu lineární osu. Cena lineární osy s ozubeným hřebenem a šnekovou převodovkou od firmy Güdel dokonce přesahovala 400 000 kč bez DPH. Řešení od firmy Igus sice představuje finančně méně náročné řešení, nevýhodou však je pohon ozubeným řemenem. Ten při dlouhodobém provozu podléhá ztrátě předepnutí. Bylo by tedy nutné systém vybavit odměřováním a to přímým. (Uvedené ceny vyplývají z emailové korespondence s obchodními zástupci jednotlivých společností.)

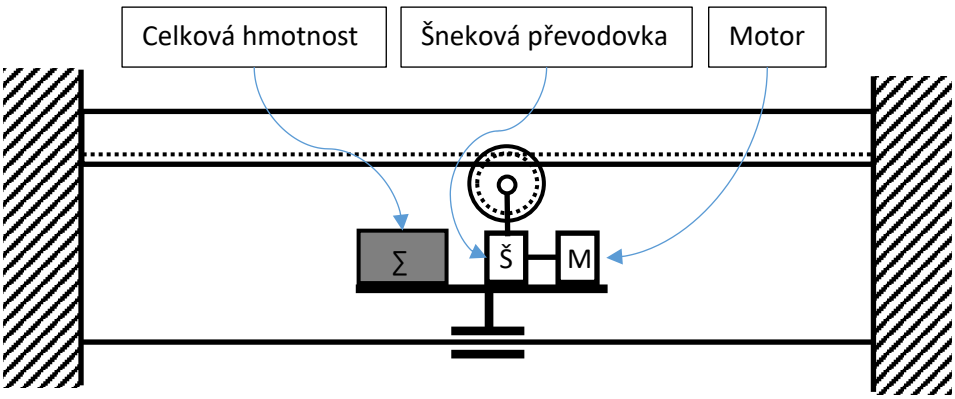
Dalším řešením s příznivým poměrem cena/výkon je lineární osa AG.CR od společnosti T.E.A. Technik (Obr. 40). Pohon je realizován pomocí ozubeného řemene a pastorku. Osa je dále vybavena rolničkovým vedením a šnekovou převodovkou. Jak již bylo uvedeno, zajímavá je i cena, která se (v závislosti na typu vozíku a modelu převodovky) pohybuje okolo 40 000 kč bez DPH.

Obr. 40 Lineární osa s hřebenem AG.CR [30]

Na základě právě uvedeného srovnání byla po konzultaci se zadavatelem diplomové práce pro další zkoumání zvolena **varianta od firmy T.E.A. Technik, model AG.CR.**

3.2.5. Návrh pohonů manipulátoru

V předešlé kapitole byla představena zvolená lineární osa, která bude použita jak pro horizontální, tak pro vertikální posuv koncového bodu. Tato kapitola je věnována návrhovému výpočtu elektromotorů jednotlivých os.



Obr. 41 Schéma pohybové osy

Pro návrh pohonu je stěžejní určit redukovaný moment na rotor elektromotoru (vertikální osa je značena indexem: 1):

$$E_{k\,1} = \frac{1}{2} * \left(\sum m_{i\,1}\right) * v_{vozík\,1}^2 + \frac{1}{2} * I_{pastorek\,1} * \omega_{pastorek\,1}^2 + \frac{1}{2} * I_{rotor\,1} * \omega_{rotor\,1}^2 \qquad \text{Rov. 3}$$

$$\sum m_{i\,1} = m_{sonda} + m_{přípravek\,1} + m_{motor\,1} + m_{převodovka\,1} + m_{vozík\,1} + m_{pastorek\,1} = m_{celková\,1} \qquad \text{Rov. 4}$$

$$I_{pastorek\,1} = \frac{1}{2} * m_{pastorek\,1} * r_{pastorek\,1}^2 = \frac{\pi * (z_1 * m'_1)^2}{8} * h'_1 * \rho * \left(\frac{m_1' * z_1}{2}\right)^2 \qquad \text{Rov. 5}$$

Kde m_1' je modul ozubení, z_1 je počet zubů, h'_1 je šířka pastorku a ρ je hustota ocele. Moment setrvačnosti rotoru je katalogová veličina.

$$\frac{v_{vozík\,1}}{\omega_{pastorek\,1}} = h_1\ [m * rad^{-1}] \qquad p_1 = \frac{\omega_{rotor\,1}}{\omega_{pastorek\,1}} \qquad \text{Rov. 6}$$

$$\omega_{pastorek\,1} = \frac{\omega_{rotor\,1}}{p_1} \qquad v_{vozík\,1} = h_1 * \frac{\omega_{rotor\,1}}{p_1} \qquad \text{Rov. 7}$$

$$h_1 = 2 * \pi * r_{pastorek\,1} * \frac{1}{1000 * 2 * \pi} = 2 * \pi * \frac{z_1 * m'_1}{2} * \frac{1}{1000 * 2 * \pi}\ [m * rad^{-1}] \qquad \text{Rov. 8}$$

$$E_{k\,1} = \frac{1}{2} * \left(m_{celková\,1} * \frac{h_1^2}{p_1^2} + I_{pastorek\,1} * \frac{1}{p_1^2} + I_{rotor\,1}\right) * \omega_{rotor\,1}^2 \qquad \text{Rov. 9}$$

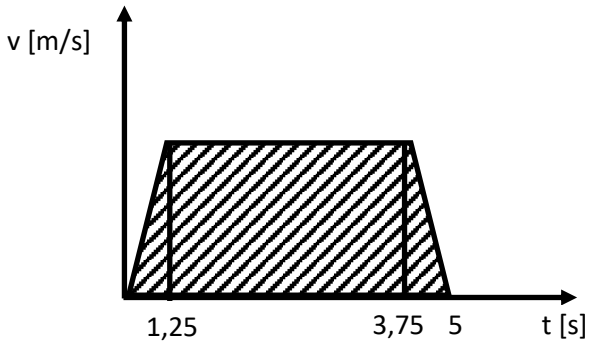
$$\boldsymbol{I_{C\,red\,rotor\,1} = m_{celková\,1} * \frac{h_1^2}{p_1^2} + I_{pastorek\,1} * \frac{1}{p_1^2} + I_{rotor\,1}} \qquad \text{Rov. 10}$$

Jediný rozdíl výpočtu horizontální osy (index 2) je celková hmotnost pohyblivých částí:

$$\sum m_{i\,2} = m_{celková\,1} + m_{přípravek\,2} + m_{motor\,2} + m_{převodovka\,2} + m_{vozík\,2} + m_{pastorek\,2} = m_{celková\,2} \qquad \text{Rov. 11}$$

$$\boldsymbol{I_{C\,red\,rotor\,2} = m_{celková\,2} * \frac{h_2^2}{p_2^2} + I_{pastorek\,2} * \frac{1}{p_2^2} + I_{rotor\,2}} \qquad \text{Rov. 12}$$

Celkový redukovaný moment setrvačnosti slouží společně s požadovanými dynamickými vlastnostmi jako vstup pro určení teoretického kroutícího momentu a otáček elektromotoru. Požadavek polohování z jedné měřené pozice do druhé (vzdálenost 100 [mm]) během 5 [s] je určující pro zjednodušený průběh rychlosti pojezdu v čase. Pro jednoduchost výpočtu je uvažována akcelerace a decelerace během čtvrtiny z celkového trvání pojezdu. Teoretická maximální rychlost se pak snadno vypočte z obsahu plochy pod křivkou, který odpovídá celkové délce pohybu (Obr. 42).



Obr. 42 Průběh rychlosti v čase

$$s = v * t = 1{,}25 * v_{max} + 2{,}5 * v_{max} = 0{,}1\ [m] \qquad \text{Rov. 13}$$

$$v_{max} = 0{,}026\ [m * s^{-1}] \qquad \text{Rov. 14}$$

$$a_{vozík} = \frac{0{,}026}{1{,}25} = 0{,}0213\ [m * s^{-2}] \qquad \text{Rov. 15}$$

$$h = \frac{a_{vozík}}{\propto_{pastorek}} \qquad p = \frac{\alpha_{rotor}}{\alpha_{pastorek}} \qquad I_{C\,red\,rotor} * \alpha_{rotor} = M_{motor\,teor.} * \eta \qquad \text{Rov. 16}$$

$$\boldsymbol{M_{motor\,teor.} = I_{C\,red} * \frac{a_{vozík}}{h * \eta} * p} \qquad \text{Rov. 17}$$

$$\omega_{rotor} = p * \frac{v_{max}}{h}\,[rad * s^{-1}] \qquad \boldsymbol{n_{rotor} = \frac{\omega_{rotor}}{2 * \pi}\,[ot * s^{-1}]} \qquad \text{Rov. 18}$$

Uvedený výpočet je vhodné provádět v některém z výpočetních programů (byl použit MS Excel) a vstupní parametry jako moment setrvačnosti rotoru, hmotnost motoru nebo převodový poměr šnekové převodovky měnit parametricky. S rostoucím převodovým poměrem roste podíl celkové hmotnosti na celkovém momentu setrvačnosti. Také umožňuje využít vyšší otáčky motoru i při poměrně pomalých pojezdech během měření. S rostoucím převodovým poměrem také roste samosvornost šnekové převodovky, což je žádoucí efekt. Naopak klesá účinnost. Z toho důvodu je dále uvažován relativně vysoký převodový poměr ($p = 50$).

Teoretický kroutící moment je dále vynásoben koeficientem, který zohledňuje riziko „ztráty kroku“ krokových motorů.

$$M_{motor\ pož.} = 3 * M_{motor\ teor.} \qquad \text{Rov. 19}$$

Při dosazení parametrů (hmotnosti motoru a momentu setrvačnosti rotoru) z katalogu prodejce krokových motorů Microcon se lze dopočítat konečných požadovaných kroutících momentů jednotlivých motorů. Byly uvažovány hodnoty produktu „SM2321-1801“. [31]

$$m_{motor} = 1{,}13\ [kg] \qquad I_{rotor} = 18 * 10^{-6}\ [kg * m^2] \qquad \text{Rov. 20}$$

Z čehož dle výše uvedeného výpočtu plyne:

$$M_{motor\ pož.\ 1} = 3 * 3{,}85 * 10^{-3} = 1{,}16 * 10^{-2}\ [Nm] \qquad \text{Rov. 21}$$

$$M_{motor\ pož.\ 2} = 3 * 5{,}15 * 10^{-3} = 1{,}55 * 10^{-2}\ [Nm] \qquad \text{Rov. 22}$$

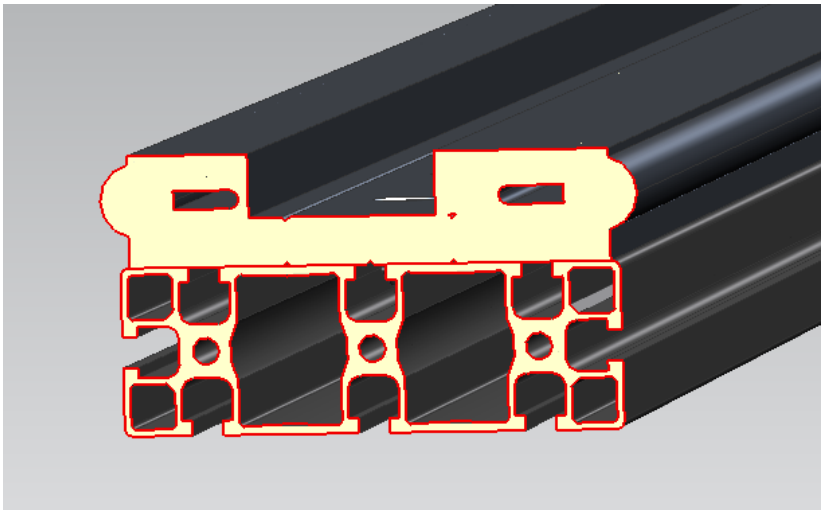
Uvedený krokový motor disponuje statickým kroutícím momentem 1,8 [Nm]. S rostoucími otáčkami moment klesá (momentovou charakteristiku řešeného modelu bohužel dodavatel neuvádí). Při dosažení maximální uvažované rychlosti $v_{max} = 0{,}026\ [m * s^{-1}]$ jsou otáčky rotoru:

$$n_{max} = 11{,}8\ [ot * s^{-1}] \qquad \text{Rov. 23}$$

Zmíněný krokový motor tedy vyhovuje požadovaným parametrům. K výše uvedenému teoretickému výpočtu je nutné přistupovat kriticky. Hlavním rizikem je „ztráta kroku“ krokového motoru, ke které dochází při vyšších zatíženích motoru. K těm sice v počítaném pracovním cyklu řešené aplikace nedochází, ale velkou neznámou jsou vlastnosti šnekové převodovky. Především pak adhezní jevy, které by při roztáčení celého pohonu ze zastaveného stavu mohly představovat vysoké hodnoty odporového kroutícího momentu. Ztráta kroku je bez zpětnovazební smyčky závažný problém. Nebylo by možné spoléhat na přesnost polohování. Z toho důvodu bude návrhový výpočet pohonů pohybových os uvažován pouze jako ověření nevelikých nároků řešené aplikace. Při stavbě reálného zařízení však autor diplomové práce doporučuje použití co možná nejsilnějšího krokového motoru. Jak je patrné z nevelikého rozdílu výsledných požadovaných kroutících momentů jednotlivých os, nárůst hmotnosti a tím momentu setrvačnosti motoru výrazně nenavyšuje požadavky na pohon.

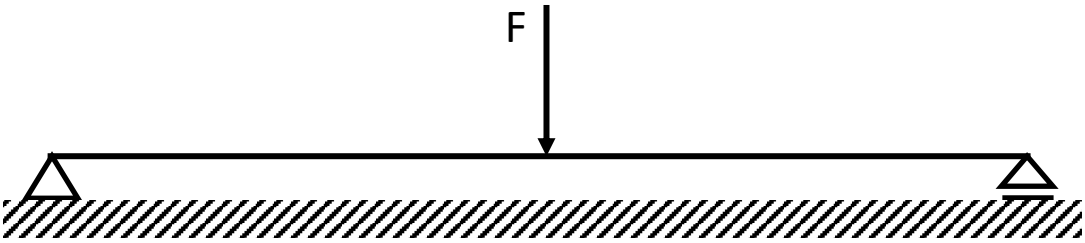
3.2.6. Pevnostní kontrola horizontální osy

V této kapitole bude vyšetřena pevnost horizontální osy vybrané kinematické struktury. Tato osa bude pro účely výpočtu modelována jako staticky určitý nosník, který je zatížen spojitým zatížením (vlastní tíhou) a vnější silou (od tíhy svislé osy, ta bude uvažována v nejméně příznivém místě – uprostřed nosníku). Nosník je (z pohledu pevnosti) nešťastně orientován. Je ohýbán ve výrazně poddajnějším směru. (Obr. 43) Důvod takto nevhodné orientace je snížení velikosti odrazových ploch ve směru šíření akustických vln, aby byl snížen vliv přítomnosti konstrukce na měření.



Obr. 43 Řez horizontální osou

Bylo vypočteno posunutí v nejméně příznivém bodě nosníku, v jeho středu. K tomu bylo využito Mohrova integrálu a principu superpozice. Nejprve byla vypočtena deformace od vnější síly (Obr. 44):



Obr. 44 Staticky určitý nosník zatížený vnější silou

Bylo využito symetrie zatížení nosníku. Z toho důvodu je možné vypočítat účinek pouze na polovině nosníku a vynásobit jej dvěma.

$$M_o(x) = \frac{F}{2} * x \quad m(x) = \frac{1}{2} * x \qquad \textit{Rov. 24}$$

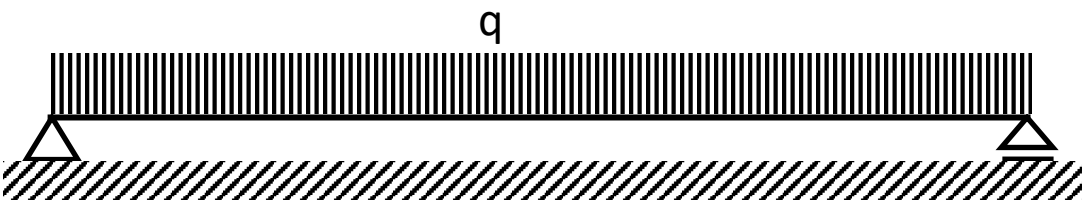
Dále je potřeba spočítat osový kvadratický moment průřezu profilu. Průřez je symetrický podle svislé osy. Jak profil Alutec K&K, tak kolejnice lineární osy jsou ze slitiny hliníku. Shodný materiál umožňuje nosník počítat pomocí Mohrova integrálu jako jednosložkový. V případě rozdílných materiálů by bylo nutné počítat nosník jako „sandwich“ (rozdílný výpočetní model používaný u konstrukcí z kompozitních materiálů). Z právě uvedených informací vyplývá výpočet, jehož vstupy jsou katalogové hodnoty:

$$J = J_{profil} + J_{kolejnice} \qquad \textit{Rov. 25}$$

Mohrův integrál:

$$v_F = \frac{1}{E * J_z} * 2 * \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{F}{2} * x * \frac{1}{2} * x\right) dx = \frac{F * L^3}{48 * E * J} \qquad \text{Rov. 26}$$

Analogicky pro nosník zatížený spojitým zatížením (Obr. 45):



Obr. 45 Staticky určitý nosník zatížený spojitým ztížením

Průběhy momentů:

$$M_o(x) = \frac{q * L}{2} * x - \frac{q}{2} * x^2 \quad m(x) = \frac{1}{2} * x \qquad \text{Rov. 27}$$

Mohrův integrál:

$$v_q = \frac{2}{E * J_z} * \int_0^{L/2} \left(\frac{q * L}{2} * x - \frac{q * x^2}{2}\right) * \left(\frac{1}{2} * x\right) dx = \frac{160 * q * L^4}{12288 * E * J} \qquad \text{Rov. 28}$$

Využitím již zmíněné superpozice je možné oba výsledky sečíst a získat tak vztah pro výpočet posunutí v místě středu nosníku.

$$v_C = \frac{F * L^3}{48 * E * J} + \frac{160 * q * L^4}{12288 * E * J} \doteq 20.0\ [mm] \qquad \text{Rov. 29}$$

Numerický výpočet byl proveden v programu MS Excel a je přiložen jako příloha DP.

Výsledný průhyb je poměrně značný. Tento problém je možné kompenzovat v rámci řídícího programu pohybových os. Z toho důvodu byly pomocí Mohrova integrálu napočteny průhyby v místě působiště síly F při obecné poloze této síly. Také byly napočteny průhyby od spojitého zatížení po celé délce nosníku (zde je možné použít Bernoulliho rovnici průhybové čáry; lze však použít i doposud používaný Mohrův integrál při obecné poloze jednotkového silového účinku) (Obr. 46).

Obr. 46 Staticky určitý nesymetricky zatížený nosník

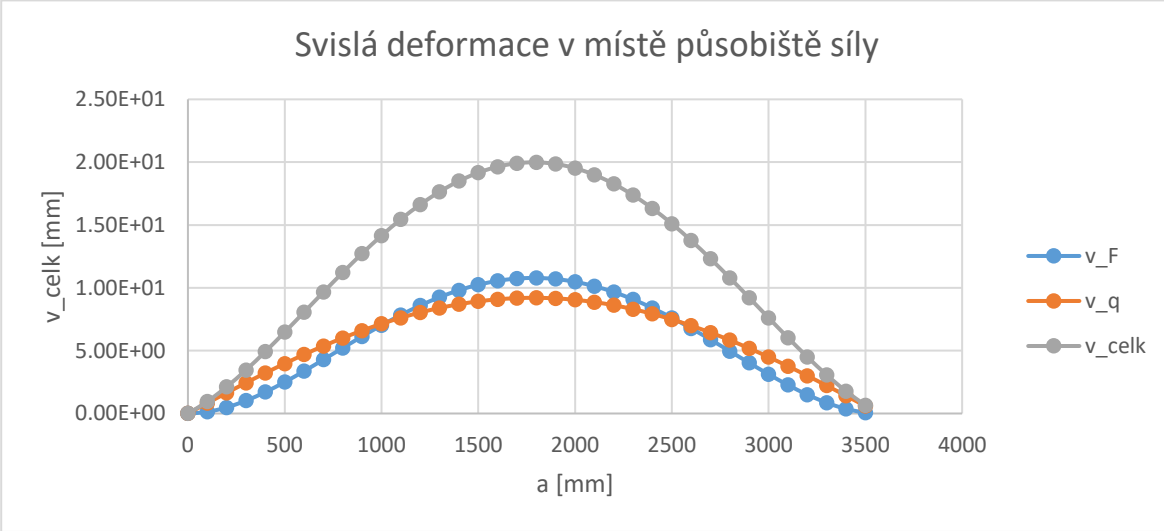
Rozměr „a“ je uvažován jako proměnná. Jednotkový účinek síly má shodnou polohu se silou F (síla F představuje tíhu svislé osy, pomocí které se deformace kompenzuje).

$$v_{celk} = v_F + v_q \quad b = L - a \quad a \neq konst. \qquad \text{Rov. 30}$$

$$v_F = \frac{1}{E * J}\left[\int_0^a \left(F * \frac{b}{L} * x\right) * \left(\frac{b}{L} * x\right) dx + \int_0^b \left(F * \frac{a}{L} * \bar{x}\right) * \left(\frac{a}{L} * \bar{x}\right) d\bar{x}\right] \qquad \text{Rov. 31}$$

$$v_q = \frac{1}{E * J}\left[\int_0^a \left(\frac{q * L}{2} * x - \frac{q}{2} * x^2\right) * \left(\frac{b}{L} * x\right) dx + \int_0^b \left(\frac{q * L}{2} * \bar{x} - \frac{q * \bar{x}^2}{2}\right) * \left(\frac{a}{L} * \bar{x}\right) d\bar{x}\right] \qquad \text{Rov. 32}$$

Z uvedených rovnic vyplývá vztah pro určení průhybu v obecném místě působiště síly (Obr. 47). Tato funkce proměnné „a“ **slouží k přepočtu velikosti korekce na základě aktuální polohy osy X**. Z návrhu konstrukce plyne, že poloha působiště síly (schematicky rozměr „a“, který odpovídá středu vozíku) se pohybuje v intervalu od 306 [mm] do 3 296 [mm].



Obr. 47 Průběh svislé deformace v obecném místě působiště síly F

3.2.7. Výčet vhodných řídících systémů

Výběr řídícího systému má zásadní vliv na podobu řídící i výkonové elektroniky manipulátoru. Dále také určuje způsob a možnosti programování řídícího programu. V této kapitole budou stručně představeny tři vybrané řídící systémy.

První uvažovaná varianta řídícího systému je řešení od výrobce **Beckhoff**, který se specializuje na výrobu řídící techniky a související elektroniky (frekvenční měniče, servomotory, krokové motory, HMI panely atd.). Řídícím prvkem je PLC (programmable logical controller, programovatelný automat). Modulární programovatelný automat zvoleného výpočetního výkonu lze osadit vstupními nebo výstupními moduly dle

požadavků řešené aplikace. V případě vyšetřovaného jednoúčelového manipulátoru se jedná o moduly určené pro ovládání krokových motorů (EL7041-0052). Na základě úvahy popsané v kapitole věnované návrhu pohonů byl vybrán krokový motor AS2042-1H00, který potřebuje k provozu proud až 5,6 [A] při napětí 24 až 50 [V]. [32] Modul určený k obsluze krokových motorů je schopen při napětí 50 [V] poskytnout až 5 [A]. [33] Po konzultaci s technickou podporou je dále (ve finančním zhodnocení) uvažováno nezařazení externího silového buzení krokového motoru. Krokový motor je tedy napájen přímo z modulárního členu programovatelného automatu. Vybraný model PLC je vybaven základním HMI panelem pro obsluhu řídícího programu. Cenová politika společnosti je specifická. Vývojářské prostředí pro programování PLC od firmy Beckhoff i jeho virtuální zkušební provoz je zdarma. Platí se jednorázový poplatek za provoz řídícího programu na fyzickém zařízení. Tato skutečnost z popsaného řešení činí poměrně finančně dostupné řešení i pro pracoviště, kde se nejedná o zavedenou platformu. U konkurence je z pravidla nutné zaplatit vysokou počáteční sumu za nákup licencí vývojářského prostředí a až následně dělit tyto náklady mezi co největší počet projektů (zprovozněných aplikací).

Další alternativou je platforma compact RIO (cRIO) od společnosti **National Instruments**. Jedná se o průmyslový počítač, který je opět možné osadit celou škálou vstupních a výstupních modulů. Toto řešení se od varianty zmíněné v předchozím odstavci odlišuje především zamýšleným použitím. PLC se obecně používají pro komerčně prodávané průmyslové zařízení (ale i chytré domácnosti a další aplikace), které obvykle programují specializovaní odborníci a nepočítá se s výraznějšími úpravami aplikace. Naopak řídící systém cRIO je primárně určen pro použití ve vědeckých pracovištích a ve vývoji. Tento rozdíl se projevuje na frekvencích, kterými jsou jednotlivé platformy schopné sbírat data, ale i na způsobu programování. Řídící program pro cRIO se je vytvářen v programu LabVIEW a to pomocí uživatelsky přívětivého grafického programovacího jazyka, který však dovoluje poměrně detailní práci s daty. Programátor pracující s LabVIEW je tedy v relativně krátkém čase schopen obstarat řídící program experimentálního měření nebo prototypu vyvíjeného zařízení. Z právě popsaných důvodů je platforma cRIO již zavedený nástroj v Inovačním centru Bobcat (zadavatel DP). [34]

Poslední možnost, která v této kapitole bude představena, je řešení od firmy **Gravos**. Jedná se o malou společnost zabývající se výrobou řídících systémů modelářských CNC frézek. Svou povahou se jedná o uzavřené ekonomicky výhodné řešení bez možnosti větší

modifikace. Řídící jednotka je obsluhována aplikací v osobním počítači, ve které se zadává trajektorie pomocí G kodu. Firma Gravos dále nabízí i krokové motory a jejich silové budiče. [35]

Na základě výše uvedeného srovnání a diskuse se zadavatelem práce byla pro další řešení zvolena varianta cRIO od firmy National Instruments. Důvodem tohoto rozhodnutí je profesionální úroveň provedení (narozdíl od řešení firmy Gravos) a skutečnost, že se jedná o léta používaný nástroj na pracovišti zadavatele DP (narozdíl od řešení firmy Beckhoff).

3.2.8. Zhodnocení varianty jednoúčelový manipulátor

Řešit polohování akustické intenzitní sondy pomocí jednoúčelového manipulátoru vlastní výroby je finančně výrazně méně náročné řešení. V příloze DP se nachází přibližná podoba rozpočtu. Při zohlednění již dostupných prostředků na pracovišti zadavatele práce (licencí programu LabVIEW, softwareového modulu SoftMOTION a samotného průmyslového počítače cRIO) se náklady pohybují pod úrovní **200 000 kč**, což je ve srovnání s univerzálním kolaborativním robotem zlomek ceny.

Nízká cena je dána především účelností této koncepce. Na rozdíl od kolaborativního robotu je použitelnost zařízení při jiných měření nulová. Také se jedná o konstrukčně robustní řešení. Dle předběžných odhadů se celková hmotnost zařízení pohybuje okolo 180 [kg].

3.2.9. Volba řešení

Uvažované varianty již byly v kapitolách 3.1.3 a 3.2.8 technicky a finančně charakterizovány. Uvedené informace byly předloženy zadavateli práce, který po zvážení zvolil pro další rozpracování variantu vlastního manipulátoru.

Důvodem tohoto rozhodnutí byly především finanční náročnost řešení kolaborativním robotem.

3.3. Návrh řídícího systému jednoúčelového manipulátoru

V předchozí kapitole byla představena možná řešení. Byl předložen jejich bližší rozbor, který posloužil pro diskusi se zadavatelem práce a následnou volbu.

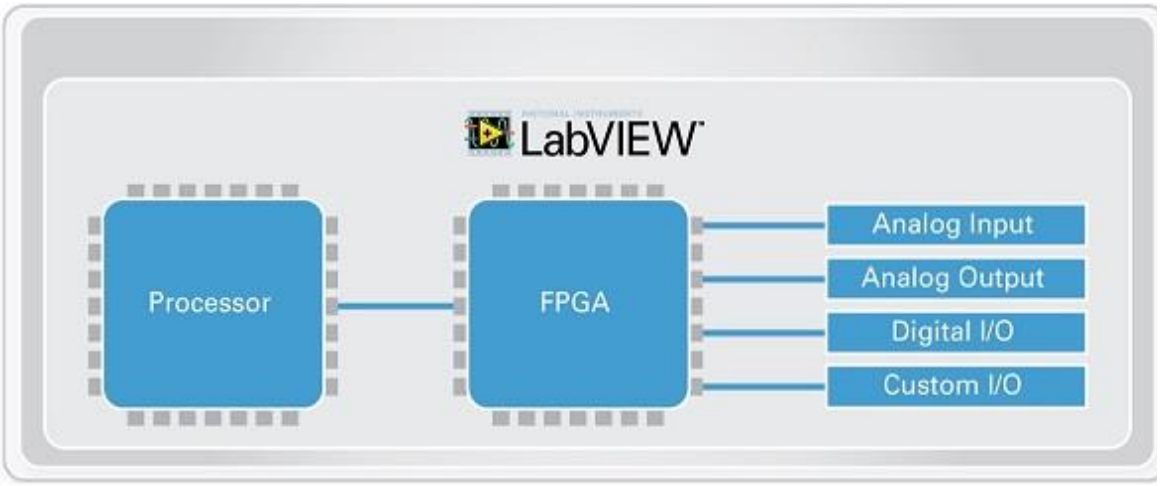
Tato kapitola je věnována řešení koncepčního návrhu řídícího systému. Ten dle požadavku zadavatele práce bude řešen na platformě cRIO (Obr. 48). Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.2.7, jedná se o modulární průmyslový počítač od společnosti National Instruments, která se zabývá jak produkcí hardware, tak software. Vývojářské prostředí pro programování cRIO se nazývá LabVIEW. Zdrojový kód programu je „psán“ v grafickém programovacím jazyce.

Obr. 48 cRIO 9063 [36]

Program psaný v LabVIEW se nazývá „Virtual Instrument“ (dále jen VI). Uživatelem psaný program určený pro opakované volání v jiných VI se nazývají subVI. Takzvaný „Projekt“ v LabVIEW spojuje dílčí VI a subVI do ucelené struktury, která dále zahrnuje práci s řízeným hardware. Jedná se o samotné cRIO, jeho procesor, programovatelné hradlové pole a vstupně výstupní moduly nebo v řešeném případě například i pohybové osy.

3.3.1. LabVIEW Real Time, FPGA a SOFTMOTION moduly

Již stručně představené vývojářské prostředí LabVIEW je možné a mnohdy i pro práci nezbytné vybavit doplňkovými moduly, které rozšiřují možnosti programování. Mezi nejrozšířenější patří „Real Time“ (dále jen RT) a „FPGA“ moduly. Real Time umožňuje psát programy určené pro procesor (ať už osobního počítače nebo cRIO), jejichž vykonání je pevně svázáno s reálným časem. FPGA modul umožňuje programovat na úrovni programovatelných hradlových polí. Ty jsou určeny především pro zpracování vstupních a výstupních signálů, ale lze je použít i pro logicky nenáročné operace, u kterých je vyžadován rychlý takt vykonání.



Obr. 49 Architektura průmyslového počítače NI RIO [37]

V předchozím odstavci představené moduly jsou nezbytné pro plnohodnotnou práci s cRIO. Poslední zde představený modul je již poměrně specifický. Jedná se o modul SOFTMOTION, který je určený pro programování řízení pohybových os. K tomu slouží příslušná knihovna VI. Toto řešení je úzce svázáno se vstupně výstupními cRIO moduly, které umožňují komunikaci s pohybovými osami (motory, drivery motorů nebo snímači).

Jedním z takových cRIO modulů je i NI 9512. Je určený ke komunikaci řídícího systému s driverem krokového motoru a enkodérem. National Instruments nabízí i řešení určené pro zapojení krokového motoru přímo do modulu (modul je zdrojem silového proudu pro motor, modul NI 9503). Výstupní proud je však omezený na 3 [A] RMS. [39] Z toho důvodu je pro případnou realizaci autorem této diplomové práce doporučen modul NI 9512 (Obr. 50), který pouze komunikuje s driverem krokového motoru (silový proud obstarává zmíněný driver). Jak je ale vysvětleno v následujících odstavcích, není možné provozovat (testovat a ladit) řídící program osy, která je svázána s NI 9512, aniž by zařízení bylo fyzicky přítomno.

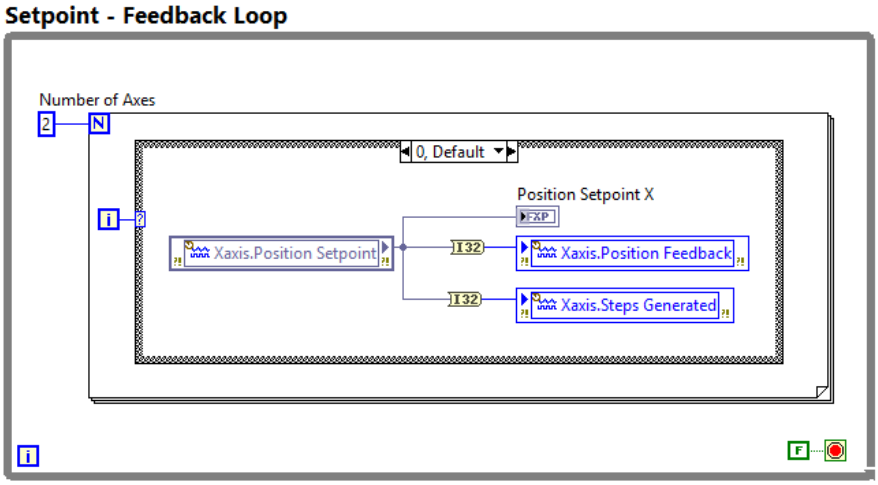
Obr. 50 NI 9512 [38]

Standardní práce s cRIO moduly v rámci LabVIEW spočívá v čtení a zapisování do proměnných daného modulu. Modul NI 9512 je netypický. Přistup je realizován pomocí rozhraní Softmotion. Pohybová osa, která se vytvoří v LabVIEW projektu, se sváže s daným modulem 9512. Osa se dále používá jako vstupní reference pro VI z knihovny Softmotion. Jinými slovy není možné přímo přistupovat na proměnné osy.

Uvedený postup platí pro situaci, kdy je přítomný řízený hardware (pohon). To neplatí pro řešený koncepční návrh, kterým se zabývá tato diplomová práce. Z toho důvodu je nutné postupovat jinak.

Pro plnohodnotný běh řídícího programu jsou potřebné informace ze snímačů. Řízení pohybu je sice pouze dopředné (nejedná se o zpětnovazební řízení, regulaci), ale i tak jsou nezbytné informace z koncových snímačů a homeswitch. Také je potřeba zapisovat aktuální stav (pozici, rychlost, zrychlení, enable, chyby…) do paměti ovládané osy, a to na základě výstupů řídícího programu. Zmíněná problematika je motivací pro naprogramování jednoduché „Software In the Loop“ simulace, která by situaci řešila.

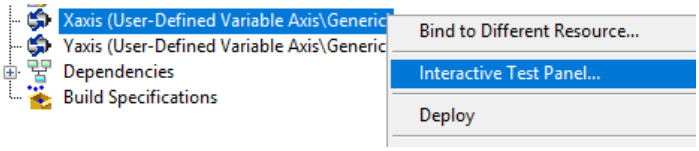
Aby bylo možné simulaci naprogramovat a provozovat, je nutné pracovat s proměnnými pohybové osy. Jedná se o sdílené proměnné, které v standardní situaci slouží ke komunikaci mezi procesorem a FPGA (programovatelným hradlovým polem). Jinak řečeno za pomoci těchto proměnných se v standardním provozu komunikuje mezi řídícím programem a řízeným zařízením (jeho aktuátory a snímači). V případě simulace se do těchto proměnných zapisuje na základě práce řídícího programu. Například pomocí proměnné „Position Setpoint“ se odesílá informace o žádané poloze z řídícího programu směrem do FPGA, kde se bez dalších úprav zapíše do proměnné „Position Feedback“, která z FPGA dává informaci řídícímu programu o aktuálním stavu osy (Obr. 51). Ovládání koncových snímačů a homeswitch je realizováno pomocí registrů pohybové osy, které jsou detailně popsány v nápovědě LabVIEW. Dále je simulována i inicializace osy (ovládá „axis enable“). Základní princip simulace byl převzat z předlohového projektu LabVIEW, konkrétně pak z „Simulated (Getting Started).lvproj“. [40]



Obr. 51 FPGA simulační program

Z uvedené problematiky vyplývá nutnost svázání Softomotion pohybových os s jinými zdroji, než moduly 9512. Konkrétně se jedná o „User Defined Variable Axis-Generic“. Toto nastavení umožňuje výše popsaný princip simulace, která dále umožní testovat a ladit řídící program bez přítomnosti řízeného zařízení.

Aktuální stav osy je pak bez nutnosti programování možné vyzkoušet přímo v stromu LabVIEW projektu, a to pomocí možnosti „Interactive Test Panel“ (Obr. 52).



Obr. 52 Interactive Test Panel

Pomocí tohoto grafického uživatelského rozhraní je možné dát příkaz enable/disable, spustit a zastavit jednoduchý pohyb, zrestartovat pozici osy a další. Jedná se nástroj vhodný k verifikaci funkčnosti simulace a případného zrestartování osy do výchozího stavu.

3.3.2. Uvažovaná fyzická konfigurace řízené osy

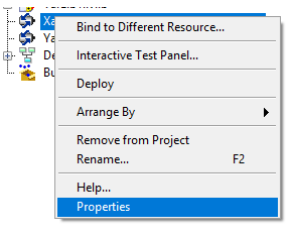
Řízené pohybové osy jsou uvažovány totožné jako při koncepčním návrhu konstrukce v kapitole 3.2.4: lineární osa s rolničkovým vedením, ozubeným hřebenem a pastorkem, šnekovou převodovkou a krokovým motorem. Dále je nutné podotknout, že není uvažován enkodér, a to z důvodu nízkých nároků na přesnost polohování. Lineární osa se tedy bude řídit bez zpětné vazby. Riziko ztráty kroků je řešeno předimenzováním síly motoru (viz kapitola 3.2.5).

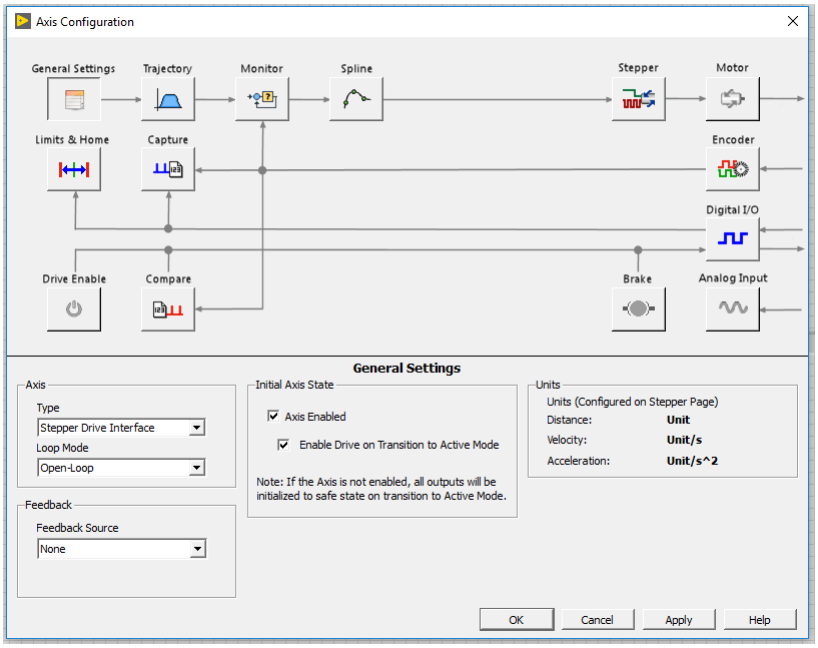
Krokový motor polohuje v diskrétních inkrementech. Pro přesné stanovení pozice pohybové osy je ale nutné i referování. Z toho důvodu je předpokládán snímač určený k referování polohy osy (tzv. „home switch“). Dále jsou na koncích osy uvažovány koncové snímače, a to z důvodu bezpečnosti.

Zdvih jednotlivých os musí být dostatečně velký, aby splňoval velikost požadovaného pracovního prostoru. Horizontální osa musí splňovat zdvih 3 000 [mm] a její vozík nese vertikální osu, díky čemuž je jeho délka (ve směru pojezdu) 400 [mm]. Při uvažování mechanického dorazu a rezervy od místa sepnutí koncového snímače celkem 172 [mm] vychází celková délka osy 3 572 [mm]. Vozík vertikální osy je dlouhý 300 [mm]. Při uvažování rezervy a požadovaného zdvihu 2 500 [mm] tak celková délka osy činí 2 962 [mm].

3.3.3. Konfigurace Softmotion pohybové osy

Při vytvoření nové pohybové osy v projektu LabVIEW je nutná konfigurace (Obr. 53). Ta probíhá v příslušném grafickém uživatelském rozhraní (Obr. 54).





Obr. 53 Axis Properties *Obr. 54 Axis Configuration*

Zde se v jednotlivých oknech nastavují parametry osy. V „General Settings“ se volí typ motoru (v tomto případě krokový motor), typ řízení (v tomto případě dopředné řízení), zpětná vazba (v tomto případě žádná) a automatické enable osy ihned po spuštění.

V okně „Trajectory“ je možné nastavit softwarové limity osy a chování po dokončení pohybu. V okně „Stepper“ je důležité nastavit typ řízení krokového motoru (Step Direction/Clockwise Counterclockwise). Dále se zde nastavuje počet potřebných kroků krokového motorů k uražení jednotky délky pohybové osy (jednotka je bezrozměrná a její volba ve vztahu k reálnému světu je tak na programátorovi). Výpočet vychází z převodu rotace rotoru na lineární pohyb vozíku.

Není uvažováno mikrokrokování. Standardní úhlový krok krokových motorů je 1,8°.

$$\frac{360}{1{,}8} = 200 \left[\frac{kroků}{otáčku}\right] \qquad \frac{200}{2 * \pi} = \frac{100}{\pi} \left[\frac{kroků}{rad}\right] \qquad \textit{Rov. 33}$$

$$h = 0{,}018 \left[\frac{m}{rad}\right] \qquad p = \frac{\varphi_{rotor}}{\varphi_{pastorek}} = 50\ [-] \qquad \textit{Rov. 34}$$

Z čehož plyne pro uvažování jednotky délky 1 [mm] vztah:

$$0{,}001\ [m] = \frac{18 * \pi}{10^5 * 50} * kroků \qquad \textit{Rov. 35}$$

A tedy:

$$\left[\frac{kroků}{mm}\right] = 88.419412829 \qquad \text{Rov. 36}$$

Dále se v okně „Limits and Home“ nastavují parametry koncové snímače a homeswitch. Jejich enable, co se má stát při sepnutí a jaká logická úroveň znamená sepnutý snímač (high/low).

V nastavení osy jsou přítomny i další nastavení jako například enkodér, nastavení spline nebo konfigurace digitálních vstupů a výstupů cRIO modulu. Tyto předvolby však není v tomto případě potřeba řešit.

3.3.4. Požadavky na řídící program manipulace

Od řídícího programu manipulátoru se očekává především řízení polohování a úkony s tím blízce spojené. Stěžejním požadavkem tedy je **polohování** ve dvou osách, a to v definovaném rastru. Výchozí parametry rastru jsou pravidelné 100 [mm] inkrementy v horizontálním i vertikálním směru. Nespornou výhodou by dále byla modifikovatelnost rastru jak ve velikosti rozteče, tak velikosti měřeného prostoru. Koncový bod by tedy měl být schopen změřit i malou oblast nacházející se v pracovním prostoru celého zařízení. Dále by řídící program měl umožňovat manuální polohování v celém pracovním prostoru.

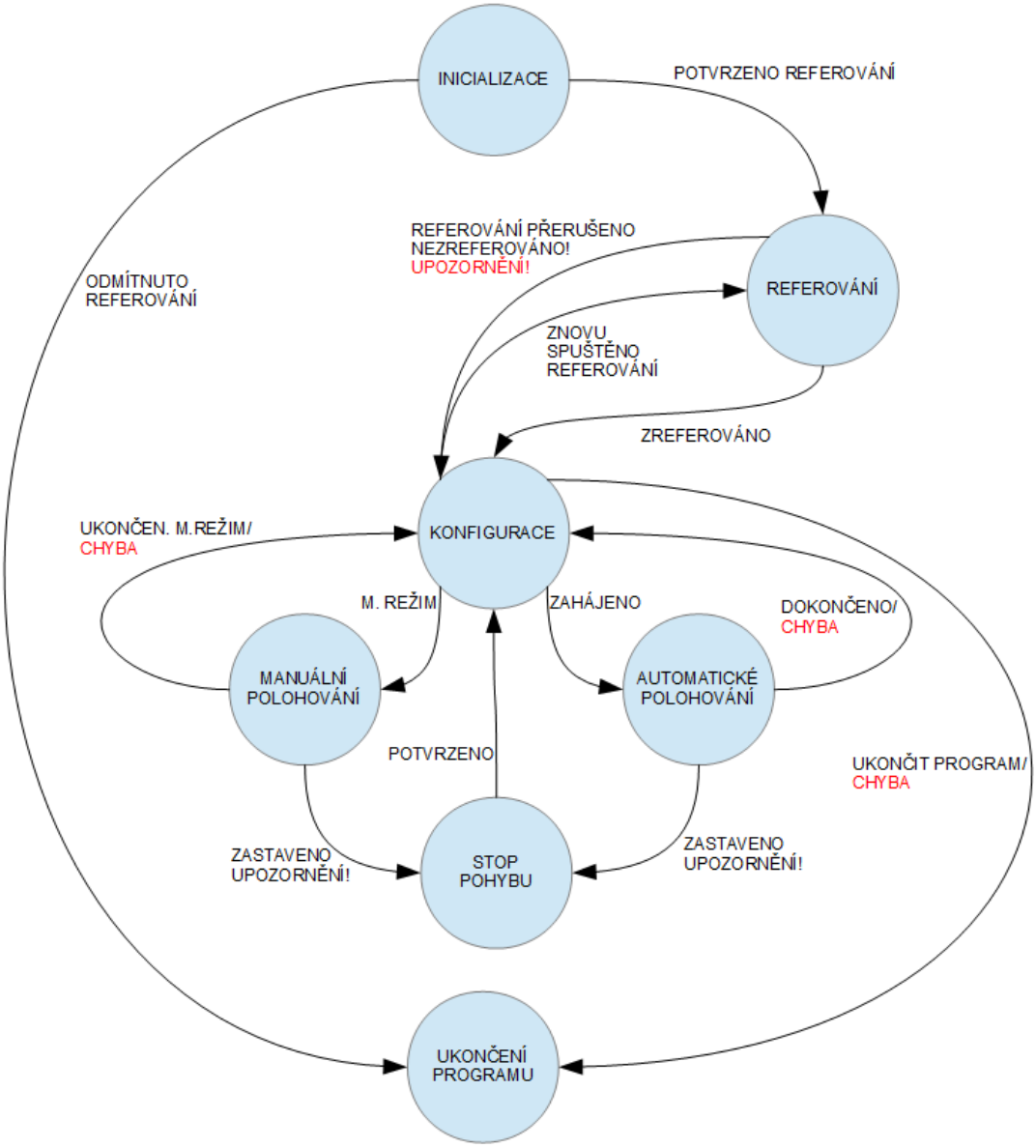
K tomu, aby bylo možné polohovat v jednotlivých osách, je potřeba znát aktuální polohu. Ta se při absenci absolutního odměřování zjišťuje pomocí **referování**. Po spuštění řídícího programu musí řídící program zreferovat obě osy. Tím se zjistí jejich aktuální pozice, na základě které je pak možno polohovat.

Při sběru dat akustickou intenzitní sodnou je potřeba minimalizovat vliv chodu zařízení na výsledky měření. Z toho důvodu by měl řídící program **vypínat napájení motorů** před zahájením měření (po dokončení polohování).

V neposlední řadě by obsluha měla být schopna polohování v případě akutní potřeby **zastavit**, a to i při nedokončení polohování. Jedná se o užitečný prvek, který by však neměl sloužit pro nouzové zastavení.

3.3.5. Stavový diagram řídícího programu

Řídící program je strukturován do stavového automatu. Od spuštění programu se tak vykonávají jednotlivé stavy, které se vzájemně volají. Zařízení se tak nachází vždy pouze v jednom stavu, který vykonává zamýšlenou úlohu (Obr. 55).



Obr. 55 Stavový diagram řídícího programu

Po spuštění řídícího programu je vyžadováno potvrzení spuštění referování. Pokud je odmítnuto, dochází k okamžitému ukončení chodu programu. Pokud v průběhu chodu referování dojde k jeho neočekávanému přerušení (pomocí STOP tlačítka), je na to obsluha upozorněna, nicméně program pokračuje do stavu konfigurace (kde je možné referování znovu spustit). Pokud nedojde ke korektnímu zreferování obou os, není možné zahájit polohování a tlačítko pro spuštění referování výstražně bliká.

Ve stavu konfigurace je možné nastavit parametry rastru, spustit manuální nebo automatické polohování. Automatický chod znamená pohyb v rastru a sběr dat. Manuální chod umožňuje relativní i absolutní zadávání souřadnic a polohování v jedné i druhé ose.

V případě, že je neočekávaně přerušeno polohování pomocí tlačítka „STOP“, dojde k zastavení polohování a po potvrzení této události dojde k návratu do stavu konfigurace. Ze stavu konfigurace je možné řídící program ukončit.

3.3.6. Paleta VI SOFTMOTION

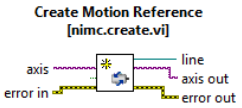
Programy v LabVIEW se skládájí, jak již bylo zmíněno, z virtuálních nástrojů („Virtual Instrument“ VI). Ty mohou být vytvořeny uživatelem nebo z knihovny připravených VI (od vydavatele programu LabVIEW: firmy National Instruments). Tyto připravené VI budou dále označovány jako „základní VI“.

Uživatelské VI se skládají ze základních VI a nazývají se subVI. Dále je možné používat takzvané „Express VI“, které se rovněž skládají z více základních VI, ale jsou přítomny v knihovně od vývojářů National Instruments (podobně jako základní VI).

Tyto Express VI jsou tedy připravené celky zdrojového kódu, které slouží k dílčím úkonům. Příkladem může být úkon polohování osy po přímce. K jeho vykonání je potřeba celá řada základních VI. Autoři LabVIEW však předpokládali častou potřebu takového úkonu a pro zrychlení práce v LabVIEW připravili Express VI, které tento úkol plní.

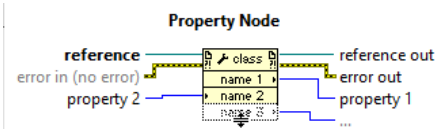
Účelnost Express VI s sebou přinášejí i omezenou funkčnost. V případě zmíněného pohybu po přímce se jedná například o přerušení nedokončeného pohybu. K ošetření takových nedostatků slouží převedení Express VI na upravitelné subVI, které může programátor LabVIEW doplnit o chybějící funkčnost. Jak bude patrno z následujících kapitol, tohoto efektivního postupu bylo hojně využíváno při realizaci řídícího programu manipulátoru.

Pro úplnost je vhodné představit i stěžejní základní VI, které jsou při práci s modulem Softmotion používány. První z nich je „Create Motion Reference“ (Obr. 56), který vytváří instanci pohybu. Právě v tomto VI se určuje, jaký typ pohybu daná instance představuje. Pro účely naší aplikace jsou zajímavé především varianty „Straight-Line Move“ a „Find Reference move“ Na tuto instanci se následně odkazuje pomocí reference pohybu, a to v rámci nastavení parametrů pohybu, jeho spuštění a zastavení.



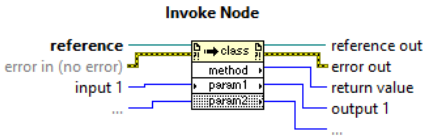
Obr. 56 Create Motion Reference [41]

K nastavení parametrů pohybu slouží „Property Node“ (Obr. 58). Jednou z jeho vstupních veličin je právě zmíněná reference pohybu. „Property Node“ umožňuje definovat žádané souřadnice, rychlost, zrychlení, jerk a další.



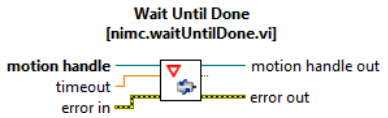
Obr. 58 Property Node [41]

Instance pohybu už je tedy vytvořena a jsou nastaveny její parametry. Dalším krokem je vyvolání tohoto pohybu, případně jeho zastavení. K tomu slouží „Invoke Node“ (Obr. 57). Dále umožňuje čtení aktuálního stavu řešené instance pohybu. Pomocí proměnné „Done“ je možné určit, zda již bylo polohování dokončeno, případně „Busy“ dává informaci o právě spuštěném pohybu, který však ještě nutně nemusí být aktivní (to nastane v situaci, kdy je pohybová osa zaneprázdněna jiným pohybem). „Active“ určuje, že daný pohyb je právě vykonáván. „Aborted“ nabyde hodnotu 1, pokud byl daný pohyb neočekávaně přerušen (nikoliv zastaven!). Pokud dojde k zastavení pohybu pomocí „Invoke Node“, proměnná „Aborted“ zůstává 0 a „Done“ 1!

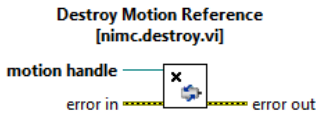


Obr. 57 Invoke Node [41]

„Wait Until Done“ (Obr. 59) je VI, které čeká na dokončení dané instance pohybu. Dokud není dokončeno, nepokračuje se ve vykonávání dalších částí programu. Toto VI neposkytuje funkci neočekávaného zastavení. Z toho důvodu nebude v řídícím programu použito. V následující kapitole je představen alternativní způsob „vyčkávání na dokončení“, postavený na „While Loop“. Posledním zde představeným VI je „Destroy Motion Reference“ (Obr. 60). Toto VI zruší alokaci paměti pro potřeby reference pohybu, čímž po skončení pohybu uvolní prostředky pro další běh programu. Práce se referencí dané instance má význam především při práci s danou instancí ve smyčce. Při každé iteraci smyčky je možné (pouze) pracovat s danou referencí a není nutné instanci znovu a znovu vytvářet, což by značně zpomalovalo chod programu. Tento poznatek je přenositelný i mimo modul Softmotion.



Obr. 59 Wait Until Done [41]

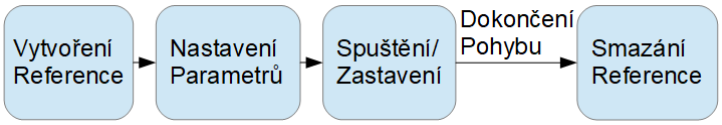


Obr. 60 Destroy Motion Reference [41]

Stavový diagram je realizován ve VI nazvaném „Main.vi“. Jedná se o základní část zdrojového kódu, ze které se volají další subVI. Ty budou představeny v následujících kapitolách.

3.3.7. Referování a polohování pohybových os

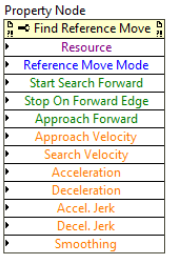
SubVI sloužící k **referování** pohybové osy vychází z Express VI „Reference“ z palety Softmotion. Jedná se o poměrně ucelené řešení problematiky referování, které nabízí bohatou konfigurovatelnost.



Obr. 61 Práce s referencí instance

Struktura výchozí podoba VI je analogická k již zmíněné práci s referencí instance pohybu (Obr. 61). K nastavení slouží „Property Node“ (Obr. 62), ke spuštněí, zastavení a čtení aktuálního stavu slouží „Invoke Node“.

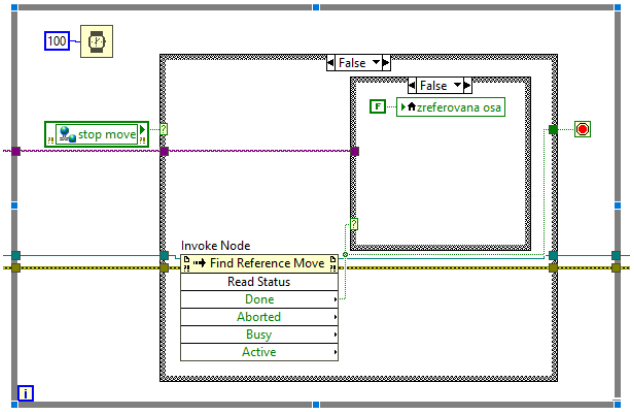
Je možné referovat na „Home Switch“ nebo „Limit Switch“ a dále chování referovacího cyklu: „Start Search Forward“ slouží k nastavení směru pohybu, kterým se pohybová osa vydá hledat zvolený snímač. „Stop On Forward Edge“ určuje, zda má referování skončit na náběžné nebo sestupné hraně signálu snímače. „Approach Forward“ určuje směr, ze kterého se má na zvolenou hranu polohovat.



Obr. 62 Property Node Find Reference Move [41]

Dále se rozlišuje „Search Velocity“ a „Approach Velocity“. První z uvedených rychlostí slouží k hledání zvoleného snímače při zcela neznámé poloze. Po sepnutí signálu referování pokračuje dle navolených předvoleb a to rychlostí „Approach Velocity“. Samozřejmostí je možnost nastavit i dalších kinematických parametrů pohybu.

Výchozí podoba Express VI byla upravena: VI „Wait until done“ bylo nahrazeno „While Loop“ (Obr. 63), která slouží k vyčkání na dokončení pohybu, případně k neočekávanému přerušení probíhajícího pohybu. V každém cyklu smyčky je vyčtena hodnota globální proměnné „Stop Move“ a proměnná „Done“ příslušné reference pohybu. Pokud dojde k stisku tlačítka „Stop“ na ovládací obrazovce („Front Panel“ VI „Main“), zapíše se do zmíněné globální proměnné hodnota 1, ta je vyčtena v právě referujícím subVI a pomocí „Invoke Node“ je pohyb zastaven. Jakmile dojde k dokončení pohybu nebo jeho předčasnému zastavení, smyčka se vypne. Při korektním dokončení referování dále dojde k vynulování polohy dané osy v systému souřadnic.



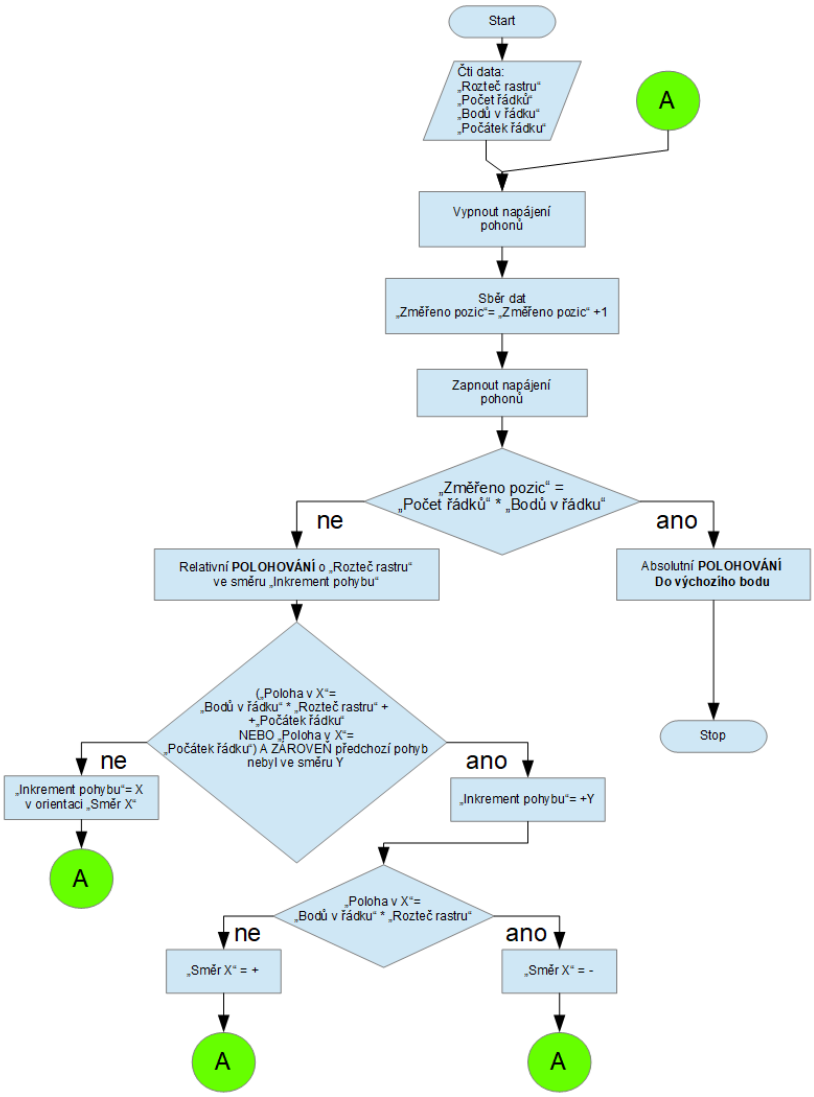
Obr. 63 While Loop

K volání právě představeného subVI dochází ve stavu „Referování“, a to pro horizontální i vertikální osu.

Dalším subVI, které bylo vytvořeno na základě Express VI slouží k **polohování osy**. Strukturou se od předchozího příliš neliší. Hlavními rozdíly jsou vytvoření instance jiného typu pohybu a s tím nutně spojená nastavení. Řízený manipulátor se bude polohovat vždy pouze v jedné ose. Typ pohybu je tedy „Line Move Mode“ a to v režimu jedné osy. Vstupní proměnnou se pak při volání subVI určí, v jaké ose se má pohyb vykonat a zda se jedná o relativní nebo absolutní polohování. Popisované subVI je také vybaveno možností neočekávaného zastavení polohování za pomoci globální proměnné.

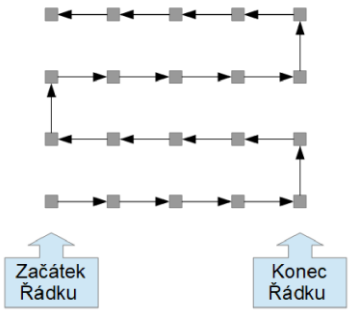
Jedním z přínosů používání subVI je možnost opakovaného použití obsaženého kódu. K volání právě popsaného subVI dochází jak ve stavu „Manuální Polohování“, tak „Automatické Polohování“. Dále se využívá i při realizaci kompenzací průhybu horizontální osy.

Při automatickém polohování dále dochází k rozhodování o směru dalšího pohybu v měřeném rastru. K tomu slouží algoritmus situovaný ve VI Main (Obr. 64).



Obr. 64 Vývojový diagram polohování v měřeném rastru

Rozhodnutí o dalším směru pohybu probíhá na základě aktuální pozice a předchozího směru pohybu (Obr. 65). Pokud je aktuální pozice počátek nebo konec řádku a zároveň předchozí pohyb nebyl mezi řádky (ve vertikálním směru), dochází k pohybu na další řádek. Při polohování mezi řádky (ve vertikálním směru) se dále rozhoduje o směru pohybu v řádku (v horizontálním směru). Aktuální pozice počátku řádku znamená kladný směr, konec řádku znamená směr záporný. Po změření posledního bodu se polohuje do výchozí pozice (ze které bylo měření zahájeno). Řídící program také měří dobu trvání polohování a měření, z čehož odhaduje zbývající čas do dokončení měření.

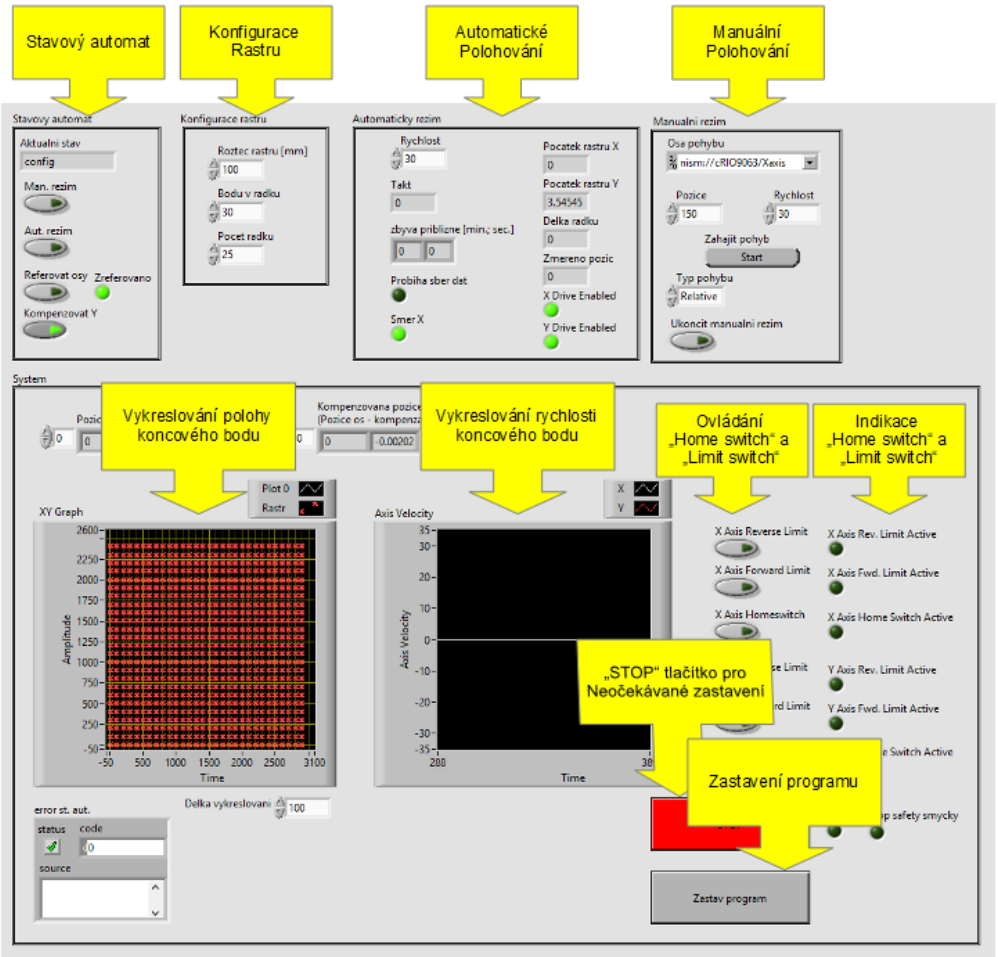


Obr. 65 Dráha pohybu mezi měřenými body

Další subVI, které je voláno poté co nastane nová poloha osy X slouží k výpočtu aktuálního průhybu konstrukce. Tato hodnota dále slouží ke kompenzování tohoto průhybu pomocí svislé osy. Zmíněný výpočet již byl představen v kapitole 3.2.6. Aktuální hodnota průhybu je srovnávána s aktuální hodnotou kompenzace, z čehož se určí potřebný posun osy Y, který je realizován pomocí subVI pro polohování osy.

3.3.8. VI Main a uživatelské rozhraní

Řídící program manipulace se ovládá z takzvaného „Front Panel“ VI Main (Obr. 66). Jedná se rozhraní určené pro komunikaci mezi programem a obsluhou. Tvorba tohoto uživatelského rozhraní je nedílnou součástí programování v LabVIEW a patří tak mezi praktické části této diplomové práce.



Obr. 66 Ovládací obrazovka řídícího programu

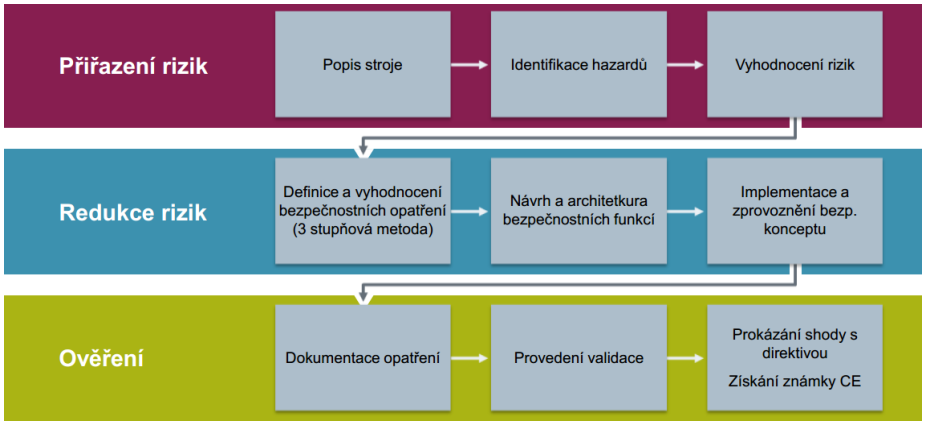
Ve VI Main je vedle stavového automatu paralelně běžící „While Loop“, uvnitř které se vyčítá aktuální stav pohybových os: aktuální čtená pozice se vykresluje v XY grafu, aktuální rychlost koncového bodu je vykreslována v časové rovině, je indikováno napájení

pohonů (které je při měření vypínáno), aktuální stav „Home switch“ a „Limit switch“ a dále zde dochází také k zapisování vstupů z „Front Panel“ do sdílených proměnných. Jedná se o proměnné ovládající „Home switch“, „Limit switch“ a ukončení programu. V další paralelně běžící „While Loop“ probíhá čtení a zápis globální proměnné „Stop Move“, která umožňuje neočekávané zastavení.

Práce s řídícím programem manipulace a jednotlivé ovládací prvky jsou detailně popsány v uživatelské příručce, která je přílohou této diplomové práce.

3.4. Problematika bezpečnosti provozu

Problematika bezpečnosti je důležitou a velmi rozsáhlou oblastí, která není stěžejním předmětem této diplomové práce. **Tato kapitola neslouží jako ucelené řešení bezpečnosti**, které by splňovalo všechny bezpečnostní požadavky a umožňovalo tak provoz zařízení, ale jako základní orientace v této nedílné součásti vývoje nového strojního zařízení. K nabytým poznatkům je přihlédnuto při koncepčním návrhu konstrukce a řízení a při realizaci zařízení by měly ulehčit komunikaci a úpravy zařízení ze strany bezpečnostního inženýra.



Obr. 67 Proces získání označení CE [42]

Základní poznatky byly čerpány z následujících směrnic, které (mimo jiné) odkazují na technické normy:

- **Strojní směrnice 2006/42/ES**
- Směrnice o elektrických zařízení 2006/95/ES
- Směrnice o elektromagnetické kompatibilitě 2004/108/ES

S uvedením strojního zařízení do provozu případně na trh by **ke každému strojnímu zařízení měl výrobce zajistit:**

- Splnění základních požadavků na ochranu zdraví a bezpečnosti;
- technickou dokumentaci;

- návod;
- zhodnocení shody se směrnicemi (viz následující odrážky);
- ES prohlášení o shodě (s technickými předpisy);
- označení CE (splnění bezpečnostních a zdravotních předpisů a norem).

Technická dokumentace by měla obsahovat:

- Popis, rozměry a výkresy zařízení a el. obvodů (potřebné k zhodnocení bezpečnosti); schéma ovládání;
- správné použití strojního zařízení;
- výkresy, výpočty a protokoly z měření nutné pro ověření splnění požadavků na bezpečnost;
- **dokumentace o analýze rizik** (Ta obsahuje informace o přijatých opatřeních za účelem omezení bezpečnostních rizik a zhodnocení zbytkových rizik. Dále výčet použitých norem a bezpečnostních požadavků, které kladou.).

Návod by měl být přizpůsoben úrovni vzdělání a způsobilosti obsluhy zařízení. Měl by popisovat správnou přepravu, uskladnění a použití zařízení, ale i předpokládat použití nesprávné a varovat před hrozícím nebezpečím. Samozřejmostí jsou nákresy, rozměry a popis zařízení, dále pokyny k instalaci a provozu zařízení. Neměly by chybět ani výčet použitých symbolů a značení na strojním zařízení, ale také pokyny pro stav havárie zařízení a údržby. [42]

Požadavky dle **EN 62061**

		Třída = F + W + P				
Závažnost zranění	S	3 až 4	5 až 7	8 až 10	11 až 13	14 až 15
Nevratné:Smrt, ztráta oka nebo končetiny	4	SIL 2	SIL 2	SIL 2	SIL 3	SIL 3
Nevratné: trvalé, ztráta prstu	3			SIL 1	SIL 2	SIL 3
Vratné, vyžaduje ošetření, léčbu	2				SIL 1	SIL 2
Vratné: první pomoc nutná	1					SIL 1

SIL =

Četnost/Doba trvání	F
≥ 1 za h	5
< 1 za h až ≥ za den	5
< 1 za den až ≥ za 14 dnů	4
< 1 za 14 Tdnů až ≥ za rok	3
< 1 za rok	2

+

Pravděpodobnost výskytu	W
Časté	5
Možné	4
Možné	3
Řídké	2
Nepravděpodobné	1

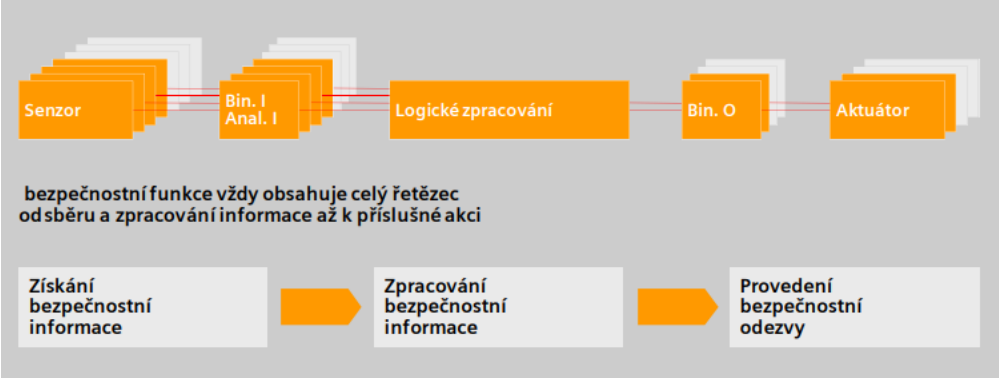
+

Pravděpodobnost vyhnutí se	P
Nemožné	5
Možné	3
Pravděpodobné	1

Obr. 68 Zjednodušený pohled na určení potřebné safety úrovně [42]

V rámci použitého řídícího systému cRIO jsou bezpečnostní prvky řešeny použitím žlutých „C Series Functional Safety Modules“ (NI 9350 a NI 9351). Dle informací udávaných výrobcem se jedná o „Safety Integrity Level 3“ (dále jen „SIL3“), a to podle normy IEC 61508.

[43] SIL3 je ve zmíněné normě definován jako *„Ne více než jedna nebezpečná chyba v bezpečnostní funkci za 1 000 let“.* [44] Nutno podotknout, že řídící jednotka je pouze jedním z článků bezpečnostní funkce. Ta se skládá z procesů od získání informace (ze símače), přenos signálu, logické vyhodnocení až po reakci aktuátorů (na základě řízení). [44] SIL celého systému je pak určeno nejnižší (nejhorší) číselnou úrovní SIL v řetězci funkce (Obr. 69). [44]



Obr. 69 Bezpečnostní funkce [44]

Zmíněné bezpečností cRIO moduly jsou vybaveny vlastním programovatelným hradlovým polem (FPGA), na kterém ve vysokém taktu běží bezpečnostní program. Napájení tohoto hradlového pole je nezávislé na řídícím systému a je situováno v čelním konektoru modulu. Vstupy modulu mohou být nezávisle na bezpečnostním programu použity i jako vstupy cRIO. Algoritmus bezpečnostního programu se neprogramuje v LabVIEW, jak tomu je u cRIO zvykem, ale v programu „Functional Safety Editor“. K dispozici jsou základní operátory Booleovy algebry: AND, OR a NOT a časovače. Pomocí těchto funkcí se realizuje stavový automat. Maximální počet proměnných v rámci jednoho modulu je 24. Chod programu, stavy vstupů, výstupů a proměnných je možné monitorovat z VI běžícím na cRIO. [45]

Obr. 70 cRIO osazené Functional Safety moduly [45]

Dostupné jsou dvě varianty bezpečnostních modulů. Liší se typem a počtem vstupů a výstupů. NI 9350 nabízí 8 digitálních vstupů a výstupů. NI 9351 nabízí 4 analogové

a 4 digitální vstupy a dále 4 digitální výstupy. Moduly se také liší reakční dobou „Safety response time“. Ta u čistě digitálního NI9350 je maximálně 250 [µs] a u NI 9351 je tato hodnota 2,1 [ms]. [45] Právě popsané digitální rozhraní je určeno pro 24 [V] logickou úroveň. Takto vysoké hodnoty jsou motivovány možností zapojení veškerých typů snímačů a aktuátorů přímo do modulu.

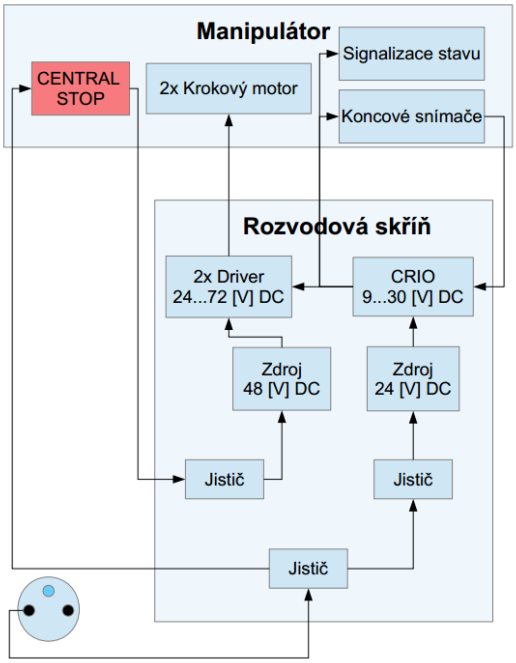
Důležitá je **úvaha nad požadavky od bezpečnostní logiky**. Potřebná síla pohonů je v teoretické fázi návrhu zařízení stále neznámou (z důvodu pasivních odporů především šnekové převodovky), z toho důvodu je pohon předimenzován a jeho síla bude omezována až experimentálně nastavením driveru motorů. V případě řízení krokových motorů bez zpětné vazby jsou tímto vyčerpány možnosti řízení síly pohonu. Samotný pohyb pak bude možné nouzově zastavit pomocí tlačítka „CENTRAL STOP“. Požadavkem na funkci tohoto tlačítka je okamžité zastavení pohybu, a to bezpečným způsobem. Zastavení pohybu by tedy nemělo znamenat následné uvolnění pohyblivých částí a jejich nekontrolovaný „pád“. V pohonu je přítomná samosvorná šneková převodovka. Uvolnění pohybu tedy nehrozí. V takové situaci k bezpečnému zastavení pohybu stačí pouze přestat napájet krokové motory. Na takto prostý úkon není potřeba v předchozích odstavcích představené řešení „Functional Safety module“ a dostačuje samotné bezpečnostní tlačítko.

Závěrem této kapitoly není konkrétní řešení bezpečnosti provozu řešeného manipulátoru. Naopak cílem této kapitoly je nabytí základního povědomí. Stěžejním je poznatek, co všechno obnáší uvedení zařízení do provozu ze strany dokumentace a bezpečnostních opatření. Dále byl nastíněn jeden z možných přístupů, a sice Functional Safety modul od firmy National Instruments.

3.5. Návrh elektroinstalace manipulátoru

Z důvodu snížení hluku, kterým manipulátor snižuje přesnost akustického měření je uvažována samostatně stojící rozvodová skříň, která by při měření byla umístěna vně semi–anechoické komory a byla by vybavena otočnými kolečky.

Rozvodová skříň by obsahovala elektrické jističe, zdroje, drivery krokových motorů a řídící systém cRIO. Zjednodušeně je situace ilustrována na Obr. 71.



Obr. 71 Blokové schéma elektroinstalace

Tlačítkem CENTRAL STOP je v případě nebezpečí přerušeno napájení driverů krokových motorů. Tento jednoduchý a účelný přístup je uvažován na základě následující rozvahy:

- Šneková převodovka je samosvorná,
- samotný manipulátor nedosahuje při pohybu vysokých rychlostí,
- redukovaný moment setrvačnosti, jak je patrné v kapitole 3.2.5, je velmi malý.

Díky tomu je možné prudce vypnout napájení (snížit kroutící moment motoru na nulu). K zastavení tak dochází v nejkratším možném čase a zároveň, díky nízkému momentu setrvačnosti, nedochází k poškození převodovky. Nutno zmínit, že nouzové zastavení není definované (kontrolované). Z toho důvodu je nutné zreferování pohybových os.

Manipulátor je samozřejmě osazen krokovými motory, ale také tlačítkem CENTRAL STOP, koncovými snímači a signalizací stavu zařízení (barevné značení napájení, pohybu a chybového stavu). Je uvažováno vedení kabeláže ochrannými oplety, které sdružují, a tím zpřehledňují, jednotlivé kabely, ale také poskytují mechanickou ochranu před otěrem.

4. Závěr

V rešeršní části byla představena problematika akustických měření. Přehled používaných snímačů byl doplněn o praxi v Testovací laboratoři Doosan Bobcat. Dále byly v rešerši představeny vhodné zařízení dostupné na trhu. Limitujícími parametry pro určení použitelnosti se ukázaly požadované rozměry pracovního prostoru (3 [m] šířka a 2,5 [m] výška). Výběr komerčního řešení pro účely přímého srovnání s vlastním navrhovaným řešením se tak poměrně omezil a jako vhodné řešení se ukázala varianta kolaborativní robot od firmy Universal Robots opatřena přípravkem pro zvětšení pracovního prostoru.

Byla stanovena potřebná velikost kolaborativního robotu a odpovídající rozměry přípravku, a sice model robotu UR10 a délka přípravku 1300 [mm]. Z velikosti pracovního prostoru a maximálního dosahu pohybu robotu s přípravkem byla vypočtena potřebná poloha robotu ve vztahu k pracovnímu prostoru. Kinematické možnosti popsané konfigurace dále byly verifikovány pomocí skriptu v programu Matlab, který využívá transformačních matic.

Alternativní přístup, jak již bylo zmíněno, je návrh vlastního manipulátoru. Byl vypracován výčet možných kinematických struktur koncepčního návrhu manipulátoru. Tyto struktury byly srovnány na základě parametrů: náročnost konstrukce, náročnost řízení, přesnost polohování, bezpečnost provozu, velikost ploch v normálovém směru na měřenou rovinu (odrazivé plochy akustických vln) a využitelnost struktury pro další aplikace. Po srovnání byla zvolena kinematická struktura „Manipulátor v kartézských souřadnicích #2“ (Obr. 72).

Pro zvolenou kinematickou variantu jsou stěžejním prvkem lineární osy. Byla vypracována rešerše lineárních os, ze které byla vybrána lineární osa od firmy T.E.A. Technik s rolničkovým vedením a pohonem, který se skládá z hřebenu a pastorku. Dále byl vypracován CAD model, a to především pro účely dalších výpočtů. Na základě redukovaných momentů setrvačnosti byly navrženy parametry pohonů jednotlivých os, které se skládají z krokových motorů, šnekových převodovek a již zmíněných lineárních os. Dále byl vypočten průběh deformace horizontální

Obr. 72 CAD model zvolené kinematické struktury

osy ve svislém směru při proměnlivé poloze zatížení (svislé osy), včetně nejméně příznivé polohy. Dále byly představeny možné řídící systémy, z nichž byla po konzultaci se zadavatelem práce zvolena platforma cRIO od firmy National Instruments.

Ze srovnání komerčního zařízení a zařízení vlastního návrhu vyplynuly následující skutečnosti. Komerční řešení (kolaborativní robot) je velmi univerzální a poměrně nákladné zařízení, které dále vyniká nízkou hmotností (29 [kg]). Manipulátor vlastního návrhu naopak představuje jednoúčelové řešení za zlomek ceny. Na základě konzultace se zadavatelem práce byla pro další řešení zvolena varianta jednoúčelový manipulátor.

Řídící program pro řídící systém cRIO byl napsán ve vývojářském prostřední LabVIEW v modulu Softmotion. Bylo nutné zprovoznit Software-In-the-Loop simulaci pro testování a odladění řídícího programu. Simulace byla realizována prostým přepisováním žádaných do skutečných hodnot proměnných pohybových os. Samotný řídící program byl koncipován jako stavový automat. Tato struktura programu umožnila v rámci jednotlivých stavů splnit všechny požadavky kladené na řídící program manipulace: referování, polohování, vypínání motorů v měřených bodech a možnost neočekávaného zastavení. Dále byla zhotovena ovládací obrazovka řídícího programu, navržena elektroinstalace a základně shrnuta problematika bezpečnosti provozu zařízení.

5. Seznamy

5.1. Citovaná literatura

1. Everest, F. Alton. *Master handbook of acoustics.* místo neznámé : ASA, 2001.

2. FS VŠB. Akustická měření - Fakulta strojní - VŠB-TUO. *www.fs.vsb.cz.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/4_Zpracovani-akustickych-velicin.pdf.

3. Doosan Bobcat EMEA s.r.o. Interní materiály. 2018.

4. Český normalizační institut. *ČSN ISO 6393 Akustika: měření vnějšího hluku vyzařovaného stroji pro zemní práce. Podmínky stacionární zkoušky.* [Norma] místo neznámé : Český normalizační institut, 2013.

5. —. *ČSN ISO 6395 +Amd.1 Akustika: měření vnějšího hluku vyzařovaného stroji pro zemní práce. Podmínky dynamické zkoušky.* místo neznámé : Český normalizační institut, 2013.

6. Schauer, Pavel. Vybrané statě z akustiky. *fyzika.fce.vutbr.cz.* [Online] 2008. [Citace: 22. 11 2018.] http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf.

7. Český normalizační institut. *ČSN ISO 6394 Akustika: měření hluku vyzařovaného stroji pro zemní práce na stanovišti obsluhy. Podmínky stacionární zkoušky.* [Norma] místo neznámé : Český normalizační institut, 2013.

8. —. *ČSN ISO 6396 Akustika: měření hluku šířeného vzduchem vyzařovaného stroji pro zemní práce. Místo obsluhy. Podmínky dynamické zkoušky.* [Norma] místo neznámé : Český normalizační institut, 2013.

9. Comparison between sound intensity probes and acoustic cameras. *blog.prosig.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] http://blog.prosig.com/2010/03/15/comparison-between-sound-intensity-probes-and-acoustic-cameras/.

10. Intensitaets sonden. *sinus-leipzig.de.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://sinus-leipzig.de/en/produkte/sensoren/intensitaetssonden.

11. Měření akustického výkonu pomocí akustické intenzity. *acs.feld.cvut.cz.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] http://acs.feld.cvut.cz/files/uak_files/uloha4.pdf.

12. Brüel & Kjær. SOUND INTENSITY PROBE KIT. *www.bksv.com.* [Online] Brüel & Kjær. [Citace: 22. 11 208.] https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-intensity-probes/3654brue.

13. GRAS. 67HA-CCP 1 m CCP Hemisphere kit. *www.gras.dk.* [Online] GRAS. [Citace: 22. 11 2018.] https://www.gras.dk/products/hemispheres/product/521-67ha-ccp.

14. Sinus. *sinus-leipzig.de.* [Online] Sinus. [Citace: 22. 11 2018.] https://sinus-leipzig.de/en/produkte/messsysteme/acousticam/afd7001-acoustic-camera.

15. Technická podpora BRÜEL & KJÆR. Neveřejné dokumenty poskytnuté výrobcem. místo neznámé : BRÜEL & KJÆR, 2018.

16. Brüel & Kjær. Microphone Positioning System — Type 9664. *bksv.com.* [Online] Brüel & Kjær. [Citace: 22. 11 2018.] https://www.bksv.com/media/doc/Bp1559.pdf.

17. Batko, W., Felis, J. a Kamisiski, T. Automation of acoustic. *imw.tu-clausthal.de.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/Forschung/InstMitt/2007/202_209_acoustic.pdf.

18. *System for automated acoustic measurements in the anechoic chamber.* Zbrowski, Andrzej, a další. 2010, Problemy Eksploatacji, stránky 115-125.

19. Fanuc. CR-35iA. *fanuc.eu.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/spolupracuj%C3%ADc%C3%AD-roboty/collaborative-cr35ia.

20. —. Spolupracující roboty. *fanuc.eu.* [Online] Fanuc. [Citace: 22. 11 2018.] https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/spolupracuj%C3%ADc%C3%AD-roboty.

21. Talácko, Jaroslav. *Automatizace výrobních zřízení.* Praha : ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02160-2.

22. Neoditech. SC0410 – SCARA Parts balancing manipulator arm – 50kg. *en.neoditech.com.* [Online] Neoditech. [Citace: 22. 11 2018.] https://en.neoditech.com/produit/bras-scara-parts-scara-titan/sc0410/.

23. Brüel and Kjaer. bksv.com. *Product Data: Sound Intensity Probe Kit for Type 2270 (bp2324).* [Online] [Citace: 15. 03 2019.] https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2324.ashx.

24. Robots and Automation Systems. *wittmann-group.com.* [Online] Wittmann. [Citace: 22. 11 2018.] https://www.wittmann-group.com/uploads/tx_wpsidebar/CNC-Robots_english_2018-03_lowres_01.pdf.

25. Gudel. Modules Catalog. *gudel.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.gudel.com/customer-support/productservice/downloads.

26. Camozzi. Series 5E electromechanical axis. *catalogue.camozzi.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] http://catalogue.camozzi.com/CATALOGUES/CCC-GENCAT/00106/PDF/ENG.1.11.15.pdf.

27. Universal Robots. UR Download Universal Robots Support. *Web Universal Robots.* [Online] [Citace: 15. 03 2019.] https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/16350/100400.PDF.

28. Skovsgaard, Zacobria Lars. Zacobria Robots Solutions. *automation-modular-industrial-robots.com.* [Online] Zacobria Robots. [Citace: 15. 03 2019.] http://www.automation-modular-industrial-robots.com/.

29. Alutec K&K. katalog.pdf. *Katalog Alutec K&K.* [Online] [Citace: 25. 03 2019.] http://katalogaluteckk.aspone.cz/Database/pdf/cz/katalog.pdf.

30. T.E.A. TECHNIK s.r.o. teatechnik.cz. *Lineární osa s hřebenem AG.CR.* [Online] T.E.A. TECHNIK s.r.o. [Citace: 25. 03 2019.] https://www.teatechnik.cz/linearni-osa-hrebenem-ag-cr/.

31. Microcon. Hybridní dvoufázové krokové motory řady SM. *microcon.cz.* [Online] [Citace: 15. 03 2019.] http://www.microcon.cz/PDF082018/motory_SM_082018.pdf.

32. Beckhoff. beckhoff.com. *AS204x | Stepper motor 5.0 Nm (standstill torque).* [Online] [Citace: 15. 03 2019.] https://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/as204x.htm.

33. —. EL7041 Stepper motor terminal. *beckhoff.com.* [Online] Beckhoff. [Citace: 15. 03 2019.] https://www.beckhoff.com/EL7041/.

34. National Instruments. CompactRIO Systems. *ni.com.* [Online] National Instruments. [Citace: 15. 03 2019.] http://www.ni.com/cs-cz/shop/compactrio.html.

35. Gravos. CNC Technologie a obráběcí stroje. *gravos.cz.* [Online] Gravos. [Citace: 15. 03 2019.] http://www.gravos.cz/.

36. National Instruments. cRIO-9063. *ni.com.* [Online] National Instruments. [Citace: 25. 04 2019.] http://www.ni.com/cs-cz/support/model.crio-9063.html.

37. —. Taking Your First Measurement in LabVIEW FPGA (Data Logging). *ni.com.* [Online] National Instruments. [Citace: 2019. 04 25.] http://www.ni.com/tutorial/54219/en/.

38. —. NI 9512. *ni.com.* [Online] NI. [Citace: 25. 04 2019.] http://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9512.html.

39. —. NI 9503 user manual. *ni.com.* [Online] [Citace: 25. 04 2019.] http://www.ni.com/pdf/manuals/375481b.pdf.

40. —. *Labview Examples.* [LabVIEW projekt] místo neznámé : National Instruments. Simulated (Getting Started).lvproj.

41. —. Softmotion module HELP. *ni.com.* [Online] National Instruments. [Citace: 2019. 05 04.] http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371093W-01/nimclvfb/dt/eng/generated/softmotion_functions/.

42. Siemens. Úvod do bezpečnostní problematiky. *Cesta k bezpečnému stroji.* [Online] 2016. [Citace: 2019. 6 15.] https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/IADT/tia_na_dosah/Documents/2017_jarni_akademie/analyza-rizik_cz.pdf.

43. National Instruments. What Are C Series Functional Safety Modules. *ni.com.* [Online] NI. [Citace: 12. 05 2019.] http://www.ni.com/cs-cz/shop/data-acquisition-and-control/what-are-c-series-functional-safety-modules.html.

44. Siemens. Funkční Bezpečnost Normy. *siemens.com.* [Online] [Citace: 10. 05 2019.] https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/IADT/tia_na_dosah/Documents/2017_jarni_akademie/01_safety_akademie_2017_funkcni_bezpecnost_normy.pdf.

45. National Instruments. Functional Safety for CompactRIO. *ni.com.* [Online] [Citace: 10. 05 2019.] http://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/17/functional-safety-for-compactrio.html.

46. Festo. Pohony s ozubeným řemenem DGE. *festo.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/DGE-ZR_CZ.PDF.

47. —. Pohony s ozubeným řemenem ELGA-TB. *festo.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/ELGA-TB_CZ.PDF.

48. —. Spindle axes ELGA-BS. *festocom.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ENGB/PDF/EN/ELGA-BS_EN.PDF.

49. Bosch Rexroth. Function Modules FMS, FMB. *boschrexroth.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/R999001418_2018-

08_EN_FMx_S19_neu_Gy.pdf?db=brmv2&lvid=1206709&mvid=13682&clid=20&sid=E43C66E44CC6637827D41883AB2C4B94.borex-tc&sch=M&id=13682,20,1206709.

50. —. Linear Modules MKK, MKR, MLR. *boschrexroth.com.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/R999000496_2018-04_EN_LM_Media.pdf?db=brmv2&lvid=1179273&mvid=13682&clid=20&sid=E43C66E44CC6637827D41883AB2C4B94.borex-tc&sch=M&id=13682,20,1179273.

51. Igus. Lubrication-free toothed belt axes. *igus.rs.* [Online] [Citace: 22. 11 2018.] https://www.igus.rs/info/linear-guides-zlw-toothed-belt-axes.

52. Hiwin. Linear axes and axis systems HX. *hiwin.cz.* [Online] [Citace: 30. 11 2018.] https://www.hiwin.cz/download/1a6e394c15ab608f8bc1094c3b17df1b.

53. Halliday, David, a další. *Fyzika.* místo neznámé : Vutium, 2013.

54. Gudel. 1-Axis linear modules. *gudel.com.* [Online] Gudel. [Citace: 22. 11 2018.] https://www.gudel.com/products/linearaxis/ep.

55. BECKHOFF. EL7031 STEPPER MOTOR TERMINAL. *beckhoff.com.* [Online] Beckhoff. [Citace: 15. 03 2019.] https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el7031.htm.

5.2. Seznam obrázků

Obr. 1 Fotografie semi-anechoické komory [3] ... 13
Obr. 2 Fotografie procedury měření [3] ... 14
Obr. 3 Fotografie procedury měření [3] ... 14
Obr. 4 Smykový nakladač, „basic length“ [4] ... 15
Obr. 5 Rozmístění mikrofonů při zkoušce [4] ... 15
Obr. 6 Helma s mikrofony ... 15
Obr. 7 Měření akustické intenzity [9] ... 16
Obr. 8 Akustická intenzitní sonda [10] ... 16
Obr. 9 Rám s vlasci ... 16
Obr. 10 Šíření zvukového vzruchu v prostoru [1] ... 18
Obr. 11 Rám s mikrofony [13] ... 18
Obr. 12 Akustická kamera [14] ... 18
Obr. 13 Výsledek měření stavebního stroje ... 18
Obr. 14 Manipulátor BRÜEL & KJÆR [15] ... 19
Obr. 15 Detail manipulátoru BRÜEL & KJÆR [15] ... 19
Obr. 16 Pětiosý manipulátor výrobce BRÜEL & KJÆR [16] ... 20
Obr. 17 Manipulátor snímače určený pro provoz v anechoické komoře [17] ... 20
Obr. 18 Manipulátor snímače určený pro provoz v anechoické komoře [18] ... 20
Obr. 19 Fanuc CR-35iA [19] ... 21
Obr. 20 Lineární podlahový, rotační a portálový modul [21] ... 21
Obr. 21 Scara robot [22] ... 22
Obr. 22 Směrová charakteristika intenzitní sondy [23] ... 22
Obr. 23 Pick and place manipulátor [24] ... 23
Obr. 24 Pick and place manipulátor [25] ... 23
Obr. 25 Sériově řazené lineární osy [26] ... 23
Obr. 26 Pracovní prostor kolaborativního robotu UR10 [27] ... 25
Obr. 27 Pohybové osy UR10 [28] ... 26
Obr. 28 Rovinné kinematické schéma s očíslovanými osami ... 26
Obr. 29 Pracovní prostor (UR10) s rozměry pro výpočet polohy osy číslo 1 ... 26
Obr. 30 Pracovní prostor s vykreslenými možnými pozicemi koncového bodu ... 27
Obr. 31 Manipulátor v kartézských souřadnicích #1 ... 30
Obr. 32 Manipulátor v kartézských souřadnicích #2 ... 30
Obr. 33 Manipulátor v kartézských souřadnicích #3 ... 31
Obr. 34 Sériově řazené rotační vazby ... 31
Obr. 35 Paralelně řazená lana ... 32
Obr. 36 Kombinace lineárního a rotačního pohybu ... 32
Obr. 37 Alternativní principy lineárního pohybu ... 33
Obr. 38 CAD model manipulátoru ... 35
Obr. 39 CAD model manipulátoru ... 35
Obr. 40 Lineární osa s hřebenem AG.CR [30] ... 36
Obr. 41 Schéma pohybové osy ... 37
Obr. 42 Průběh rychlosti v čase ... 38
Obr. 43 Řez horizontální osou ... 40
Obr. 44 Staticky určitý nosník zatížený vnější silou ... 40
Obr. 45 Staticky určitý nosník zatížený spojitým ztížením ... 41
Obr. 46 Staticky určitý nesymetricky zatížený nosník ... 41
Obr. 47 Průběh svislé deformace v obecném místě působiště síly F ... 42
Obr. 48 cRIO 9063 [36] ... 45
Obr. 49 Architektura průmyslového počítače NI RIO [37] ... 46
Obr. 50 NI 9512 [38] ... 46
Obr. 51 FPGA simulační program ... 47
Obr. 52 Interactive Test Panel ... 48

Obr. 53 Axis Properties 49
Obr. 54 Axis Configuration 49
Obr. 55 Stavový diagram řídícího programu 51
Obr. 56 Create Motion Reference [41] 52
Obr. 57 Invoke Node [41] 53
Obr. 58 Property Node [41] 53
Obr. 59 Wait Until Done [41] 53
Obr. 60 Destroy Motion Reference [41] 53
Obr. 61 Práce s referencí instance 54
Obr. 62 Property Node Find Reference Move [41] 54
Obr. 63 While Loop 55
Obr. 64 Vývojový diagram polohování v měřeném rastru 56
Obr. 65 Dráha pohybu mezi měřenými body 56
Obr. 66 Ovládací obrazovka řídícího programu 57
Obr. 67 Proces získání označení CE [42] 58
Obr. 68 Zjednodušený pohled na určení potřebné safety úrovně [42] 59
Obr. 69 Bezpečnostní funkce [44] 60
Obr. 70 cRIO osazené Functional Safety moduly [45] 60
Obr. 71 Blokové schéma elektroinstalace 62
Obr. 72 CAD model zvolené kinematické struktury 63

5.3. Seznam tabulek

Tab. 1 Zhodnocení kinematických konceptů 34

5.4. Seznam příloh

Textové přílohy

Příloha A Rešerše vhodných lineárních os

Příloha B Cenový návrh vlastního manipulátoru

Příloha C Uživatelská příručka řídícího programu manipulace

Elektronické přílohy

Příloha D Verifikace kinematiky kolaborativního robotu

Příloha E CAD model sestavy manipulátoru vlastního návrhu

Příloha F Návrhový výpočet pohonů

Příloha G Výpočet deformace nosníku

Příloha H Řídící program manipulace

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

Diplomová práce

Koncepční návrh polohovacího zařízení pro akustickou intenzitní sondu

Textové přílohy

2019 **Bc. Jan Ferkl**

Příloha A: Rešerše vhodných lineárních os

Lineární osy jsou základními stavebními kameny konstrukce vlastního manipulátoru. Jedná se o sestavu lineárního vedení (valivého, ale i kluzného) a pohonu (kuličkový nebo pohybový šroub, hřeben s pastorkem, ozubený řemen). Tato sestava je pak tradičně zakrytována před nežádoucími vlivy okolí.

Zdvih jednotlivých pracovních os odpovídá rozměrům požadovaného pracovního prostoru (3 [m] horizontální osa a 2,5 [m] osa vertikální). Takto vysoké hodnoty výrazně snižují počet vhodných os pro řešenou aplikaci. Drtivá většina komponent vyhovujících požadovanému zdvihu je poháněna ozubeným řemenem. Dalším kritickým parametrem je velikost průřezu lineární osy. Nižší rozměry znamenají malé množství odražených akustických vln, a tedy menší vliv na samotné měření.

Naopak parametr přesnosti polohování nepředstavuje problém ani při použití levnějšího principu pohonu – ozubený řemen. Hlavní nevýhodou ozubeného řemenu je však nestálost rozměru a pevnosti. Uvolněný ozubený řemen sice není problém v rámci údržby napínat. Tato procedura by však znamenala nemožnost použít nepřímé absolutní odměřování. Což je z hlediska řízení při skromných nárocích na přesnost polohování adekvátní způsob odměřování.

Maximální hmotnost polohované svislé osy je přibližně 50 [kg] (při uvažování lineární osy s ozubeným hřebenem a pastorkem od společnosti TEA Technik) a vyložení těžiště 0,1 [m]. Z těchto hodnot vychází klopný moment působící na horizontální osu 50 [Nm]. Tato hodnota by v případě potřeby zcela jistě šla snižovat použitím protizávaží (cíleným ovlivňováním rozložení hmotnosti pohyblivých částí horizontální osy) za cenu zvyšování hmotnosti pohyblivých částí manipulátoru.

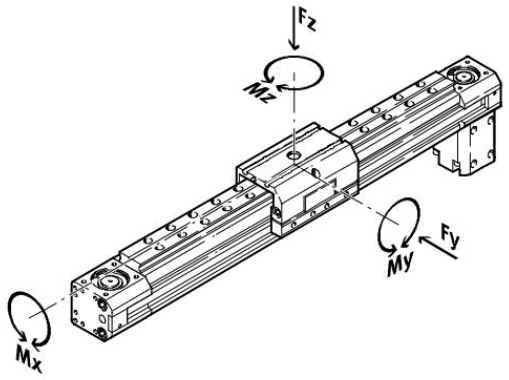
Typ vedení významně ovlivňuje plynulost pohybu. U kluzného vedení je nutné při rozjezdu překonat mez adheze a následně překonávat tření. U valivého vedení (valivých hnízd) je odpor pohybu (bez přítomnosti předpětí valivých elementů) minimální. Dále se valivé vedení vyznačuje velmi vysokou únosností a možností vymezení vůle a tuhosti pomocí předpětí (což v řešené aplikaci pravděpodobně není nutné: předpětí by sice pozitivně ovlivňovalo tuhost, ale zároveň snižovalo plynulost pohybu).

Výrobce **Festo** ve svém katalogu nabízí velkou škálu produktů, které splňují kladené nároky. Jako první bude představena řada „**DGE**“. Tato řada se dále dělí dle použitého lineárního vedení na následující skupiny:

- „**ZR**“ základní provedení bez vedení
- „**ZR-KF**“ vedení v kuličkových oběžných pouzdrech
- „**ZR-RF**“ vedení v kladkách
- „**ZR-HD**“ vedení pro velké zátěže

Základní provedení „bez vedení“ je velmi subtilní. Dovolený klopný moment ve směru osy X se řádově pohybuje pouze v jednotkách [Nm], a to napříč všemi velikostmi tohoto modelu. [46]

Valivá vedení disponují značnou únosností. Dále bude uvažována nejmenší možná velikost, která by zdvihem splňovala kladené požadavky. Jedná se o velikost 25. Provedení „s kuličkovými oběžnými pouzdry“ (valivými hnízdy, „ZR-KF“) disponuje velmi vysokým dovoleným zatížením. Alternativu s vysokou maximální rychlostí představuje skupina „ZR-RF“ („vedení v kladkách“). Maximální rychlost polohování se však při krátkých pojezdech neprojeví, neb se na krátké dráze nevyužije ani zlomek maximální rychlosti osy. Zásadní jsou hodnoty dovoleného zatížení: zvýšená únosnost klopného momentu a snížená dovolená hodnota svislé síly (Fz), oproti variantě bez vedení, toto řešení („ZR-RF“) řadí mezi skupiny „ZR“ a „ZR-KF“. Všechny varianty mají totožnou opakovatelnou přesnost a posuvovou sílu. [46]



Obr. 1 Grafické znázornění zatěžujících silových účinků lineární osy [46]

Tab. 1 Festo DGE ZR [46]

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
DGE-ZR-25	1…3000	50	±0,1	260	330	1	45x45
DGE-ZR-KF-25	1…3000	50	±0,1	260	3080	45	45x45
DGE-ZR-RF-25	1…3000	50	±0,1	260	150	7	45x45

S řadou „DGE-ZR-xx-25“ jsou kompatibilní krokové motory řady „EMMS-ST“ velikosti 57 a 87. Jsou nabízeny včetně „ovladače motorů“, který obstaravá silové napájení a řízení.

V kombinaci s dostupným inkrementálním enkoderem je možné „ovladačem motorů“ kompenzovat případnou ztrátu kroků při vysokých zatíženích. Dále jsou dostupné také bezkartáčové synchronní servomotory řady „EMMS-AS“ velikosti 55 a 70. Vyznačují se výrazně vyššími otáčkami a možností osazení servomotoru absolutním enkoderem. Rovněž jsou nabízeny příslušné „ovladače motorů“. Oba typy pohonů je možné osadit planetovou převodovkou. Je vhodné zmínit závislost kroutícího momentu (servo/krokového) motoru na maximálních otáčkách: obecně platí, že s rostoucí silou pohonu klesá hodnota maximálních otáček. Je to dáno především rostoucím průměrem rotoru a tím i jeho momentem setrvačnosti. Základní parametry uvedených řešení jsou hrubě nastíněny v následující tabulce. Bližší rozbor a výběr pohonu je jednou z náplní praktické části práce.

Tab. 2 Motory kompatibilní s řadou Festo „DGE-ZR“ [46]

řada pohonu	EMMS ST 57; 87	EMMS AS 55; 70
rozsah momentů přídržných (krok. m.)/jmenovitých (servomotory) [Nm]	0.8÷9.3	0.3÷2.3
řádově jmen. ot. [ot/min]	100÷400	4100÷7600
převodovka	planetová i=3;5	planetová i=3;5
enkodér	inkrementální 2^9 pulsů/ot	absolutní 2^18 pulsů/ot

Řada „DGE-ZR“ má od výrobce poměrně omezenou nabídku osazovaných snímačů. Dostupné jsou pouze koncové snímače různých principů: relé, polovodičová a indukční. Informace o poloze lineární osy tak vychází z referování osy na koncový snímač a následně nepřímým relativním odměřováním na krokovém motoru. Servomotory jsou vybaveny absolutním enkoderem a tedy k určení polohy není potřeba koncového snímače. [46]

Vyšší řada pohybových os s ozubeným řemenem nese označení „ELGA“. Bohatě splňuje nároky na zdvih i opakovatelnou přesnost. Jedná se ale o průřezem výrazně větší lineární osy (řada „DGE-ZR-KF“ v obdobných velikostech nabízí výrazně vyšší únosnost a přesnější enkoder). Hodnoty dovoleného klopného momentu „Mx“ by se (v ranné fázi návrhu konceptu manipulátoru při uvažování protiváhy) daly považovat za optimální. [47]

Tab. 3 Festo „ELGA“ [47]

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
ELGA-TB-KF-70	50...5000	50	±0,08	260	1850	16	67x51
ELGA-TB-KF-80	50…5000	50	±0,08	600	3050	36	80x62

Řadu lineárních os „ELGA-TB-KF“ velikosti 70 a 80 je stejně jako „DGE-ZR“ možné pohánět krokovými motoru „EMMS-ST“ a servomotory „EMMS-AS“. Na rozdíl od výše zmíněné řady („DGE-ZR“) jsou v nabídce i další řady servomotorů: „EMME-AS“ a „EMCA“. Základním stavebním kamenem těchto řad je rovněž bezkartáčový synchronní elektromotor. V případě řady „EMME-AS“ se jedná o ekonomicky úspornější řešení (než „EMMS-AS“), které je nabízeno pouze v nižších velikostech příruby. „EMME-AS“ je vybavena výrazně méně přesným enkoderem (který se odlišuje i protokolem) a jednodušším konektorem. [47]

Řada „EMCA“ nabízí integrovaný servomotor a „ovladač motoru“ (zařízení obstarávající řízení, regulaci a silové napájení) do jednotného tělesa. Obecně toto řešení nabízí úsporu prostoru (vlivem snížení počtu pozic sestavy) za cenu nárůstu rozměrů servomotoru. Možné komunikační rozhraní jsou: CANbus, Modbus a ethernet. [47]

Tab. 4 Motory kompatibilní s řadou Festo „ELGA“ [47]

řada pohonu	EMMS ST 57;87	EMMS AS 55; 70; 80; 100	EMME AS 60; 80; 100	EMCA 67
rozsah momentů přídržných (krok. m.)/jmenovitých (servomotory) [Nm]	0.8÷9.3	0.3÷7.51	0.6÷6.4	0,37÷0,45 (17,5 při použití max. nabízeného převodu)
řádově jmen. ot. [ot/min]	100÷400	3000÷7600	3000	3100
převodovka	planetová i=3;5	planetová i=3;5	planetová i=3;5	i=3÷35
enkodér	inkrementální 2^9 pulsů/ot	absolutní, 2^18 pulsů/ot protokol: Endat	absolutní, 2^9 pulsů/ot protokol: Hiperface	absolutní, 2^12 pulsů/ot

Dříve představená řada DGE-ZR není dodávána s přímým odměřováním polohy. Řada ELGA-TB-KF je nabízena v kombinaci s přímým inkrementálním odměřováním, a sice ve dvou variantách: rozlišení 2,5 a 10 [µm]. Samozřejmostí jsou totožné koncové snímače jako pro DGE-ZR. Absolutní odměřování bohužel není v nabídce. [47]

Pro názornost bude stručně představena i lineární osa vybavena kuličkovým šroubem. Festo nabízí pouze dva modely s dostačujícím pracovním zdvihem. Je vhodné zdůraznit, že se jedná o lineární osy výrazně vyšší rozměrové řady (hodnota velikosti narostla z 25 („DGE“) a 70 („ELGA-TB-KF“) na hodnotu 150; uvedená číselná označení u řady

„ELGA“ dávají informaci o šířce průřezu lineární osou v milimetrech; pro „DGE“ 25 je tato hodnota 45 [mm], u vyšších hodnot číslo odpovídá rozměru). Menší z variant nese označení „**ELGA-BS-KF-150**“, a jak je vidět v následující tabulce, svými hodnotami únosnosti řádově přesahuje hodnoty zatížení, které by mohly vznikat od vlastní tíhy případně setrvačných účinků. Obdobně lze pohlížet na hodnoty posuvové síly a opakovatelné přesnosti. [48]

Tab. 5 Festo „ELGA-BS-KF“ [48]

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
ELGA-BS-KF-150	1…3000	15	±0,02	6400	11000	167	150x122

Příčinou tak velkých rozměrů lineární osy s kuličkovým šroubem jsou kritické otáčky. Ty se při dlouhém zdvihu a malém průměru kuličkového šroubu velmi blíží budící frekvenci (provozním otáčkám). Z toho důvodu je nutné s rostoucí délkou šroubu zvyšovat i jeho průměr. Ten však není v řešené aplikaci žádoucí.

Výrobce **Bosch Rexroth** má ve své nabídce širokou škálu lineárních os, ze které budou představeny řady „Linear modules“ a „Function modules“ jakožto nejvhodnější varianty.

„**Function modules**“ je nižší (rozměrově srovnatelná, avšak disponující nižší tuhostí a vyšším třením) řada lineárních os výrobce Rexroth vybavená vedením s kuličkovými valivými hnízdy a pohonem stávajícím se z ozubeného řemenu nebo kuličkového šroubu. Varianta s kuličkovým šroubem však v rámci této modelové řady nedisponuje dostatečným zdvihem. Příčinou jsou nízké kritické otáčky, jak již bylo popsáno v předcházejících odstavcích. Dostupné jsou alternativy s jednou nebo dvěma kolejnicemi. V rámci této rešerše budou blíže představena varianta s jednou kolejnicí. Tato skupina nese označení „**FMB**“. Typ s dostačujícím zdvihem a co možná nejmenším průřezem „**FMB-080-SN-1**“ se svými parametry blíží hledané lineární ose (pro srovnání s nabídkou výrobce Festo: rozměrově je tento model odpovídající produktu „ELGA-TB-KF-80“, svými vlastnostmi si uvedené osy jsou velmi blízké). [49]

Další vybrané osy tohoto výrobce jsou již z řady „**Linear modules**“, která nabízí výrazně vyšší únosnost, jež je při řešené aplikaci již zbytečně vysoká. Dostatečné délky dosahuje i varianta poháněná kuličkovým šroubem („**MKK-080-NN-N**“), která dále vyniká i velmi vysokou přesností. Překvapivé jsou i poměrně kompaktní rozměry (doposud

představená (dostatečně dlouhá) lineární osa od výrobce Festo vybavená kuličkovým šroubem je výrazně většího průřezu). [50]

„**MKR-065-NN-3**“ je alternativní řešení z řady „Linear Modules“ poháněný ozubeným řemenem. Zmíněné produkty řady „Linear modules“ se liší především únosností a přesností. Typ osazený vedením v kladkách („MLR-080-NN-2“) převyšuje zbylé modely dvojnásobnou maximální rychlostí (10 [m/s]). Tato výhoda však není relevantní, jak již bylo v této kapitole zmíněno. [50]

Tab. 6 Lineární osy výrobce Bosch Rexroth „Function Modules“/“Linear Modules“

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
FMB-080-SN-1	150...3800	40	±0,05	445	3500	35	80x107
MKK-080-NN-3	60...3400	39,8	±0,005	15200	15200	195	80x100
MKR-065-NN-3	60...5900	50	±0,05	6400	6400	62	65x85
MLR-080-NN-2	100...10000	50	neuvedeno	3500	1500	35	80x100

Výrobce dále nabízí několik řad servomotorů, kterými je možné lineární osy osadit. Jedná se o bezkartáčové synchronní servomotory. Kompatibilní servomotory jednotlivých lineárních os se vyskytují napříč následujícími řadami: „MSM“, „ECMA“, „MS2N“, „MSK“. Jedná se o širokou nabídku, kterou nelze souhrnně představit konkrétními parametry. Stěžejní poznatek ale je, že výrobce Rexroth nenabízí krokové motory jako možnou variantu. Naopak nabízí absolutní enkodéry o rozlišení 2^20 a planetové převodovky s převodovým poměrem od 3 do 10. Obě řady je možné vybavit koncovými snímači (optickými nebo indukčními). Řada „Function Modules“ je dále nabízena včetně přímého absolutního odměřovacího systému. [49] [50]

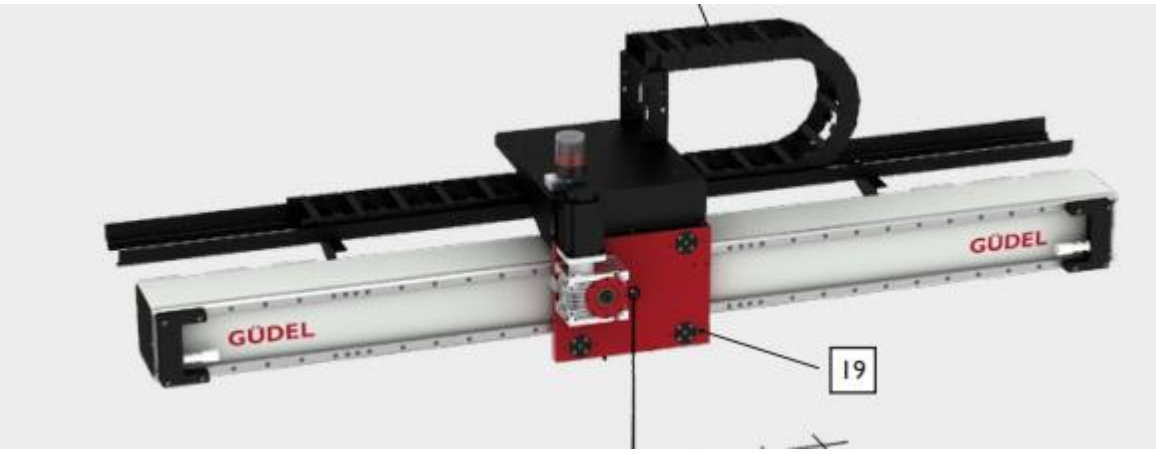
Doposud představené lineární osy jsou založené na valivých vedeních a jedná se o poměrně sofistikovaná průmyslová zařízení. Z tohoto výčtu mírně vybočuje následující řešení od firmy Igus. Ta se mimo jiné specializuje na kluzná vedení a další mechatronické komponenty konstrukční povahy. Jedním z takových produktů je lineární osa „ZLW-20“. Stěžejním rozdílem jsou již zmíněná kluzná vedení a dále nezakrytovaná minimalistická konstrukce. Díky zmíněným vlastnostem se však jedná o zajímavé řešení pro vertikální osu manipulátoru. [51]

Obr. 2 Lineární osa „ZLW-20“ výrobce Igus [51]

Tab. 7 Parametry „ZLW-20“

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
ZLW-20	1…3000	neuvedeno	0,1	750	3000	neuvedeno	-

Další z výčtu lineárních os je od výrobce Güdel, nese označení „EP“ a vyznačuje se šnekovou převodovkou (rovněž od zmíněného výrobce) a převodem na lineární pohyb realizovaným pomocí dvojice hřeben – pastorek. Tato konfigurace má za následek výrazný nárůst maximálního zdvihu (10 000 [mm]), výrazný nárůst přesnosti, samosvornost šnekové převodovky a nutnost zajištění mazání převodu hřeben–pastorek (automatický mazací systém je nabízeným příslušenstvím). Dále je nevyhnutelné umístění motoru na pohyblivý vozík. Tato skutečnost se projevuje mimo jiné i volitelným příslušenstvím – energetickým řetězem. [25]



Obr. 3 Lineární osa výrobce Gudel [25]

Nejmenší model lineární osy řady EP nese označení EP-I. Jeho průřez je srovnatelný s většími variantami modelů s řemenovým převodem. Nejmenší varianta bohužel v nabídce nemá energetický řetěz. Ten je volitelný až u větších modelů. Výrobce nenabízí řešení osazení motorů (pouze rozmanité připojovací rozměry šnekové převodovky) ani odměřování polohy. [25]

Tab. 8 Lineární osa Gudel „EP-I“ [25]

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
EP-I	300...10000	4	±0,02	-	250	35	80x81

Dalším výrobcem lineární techniky je firma **Hiwin**. Nabízí lineární osy poháněné ozubeným řemenem, kuličkovým šroubem a lineárním motorem. Všechny uvedené spadají do modelové řady „HX“. Poslední zmíněná varianta, lineární motor, je velmi pokročilé řešení, které svými parametry řádově přesahuje požadavky na vyvíjené zařízení. Tato skutečnost lze ilustrovat na přesnosti polohování, která je 5 [µm]. Z toho důvodu lineární osy poháněné lineárními motory nebudou zahrnuty do výčtu dostupných řešení. Vyhovují sice parametrům, ale svou povahou nekorespondují s šetřenou aplikací. [52]

Lineární osy poháněné ozubeným řemenem a kuličkovým šroubem se dělí do dvou kategorií, a to podle počtu lineárních vedení (jedna/dvě kolejnice). V této rešerši budou představena řešení s jednou kolejnicí. Model „HM040B“ poháněný ozubeným řemenem je srovnatelný s již doposud představenými osami, které pohání ozubený řemen. Model „HM120S“ je poháněný kuličkovým šroubem. Průřez lineární osou má rozměr 143x120 [mm], což přibližně odpovídá již představené lineární ose „ELGA-BS-KF-150“ od výrobce Festo. [52]

Tab. 9 Linární osy řady „HX“ výrobce Hiwin [52]

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	průřez [mm]
HM040B	až 3000	30	±0,05	300	963 (dyn.)	8 (dyn.)	47,5x40
HM120S	až 3800	15	±0,02	2744	12230 (dyn.)	155 (dyn.)	143x120

Výrobce Hiwin ke svým produktům nabízí přímý inkrementální odměřovací systém s přesností ±0,05 [mm]. Dále servomotory od 100 do 750 [W], ale i krokové motory. Použití krokových motorů však znamená zakázková výroba příruby elektromotoru na lineární osu. [52]

Společnost T.E.A. Technik ve své nabídce nabízí lineární osu skládající se z rolničkového vedení a ozubeného hřebenu, který je utopen v kolejnici. Vozík je osazen šnekovou převodovkou, která pohání pastorek. Na rozdíl od výrobce Gudel se jedná o relativně cenově nenáročné řešení, které svou povahou splňuje kladené nároky. Nevýhodou je předpoklad použití asynchronního elektromotoru. Při použití krokových případně servno motorů by tedy bylo nutné zkonstruovat připojovací rozhraní mezi výstup

motoru a vstup převodovky (stanovisko technické podpory). Šneková převodovka je dostupná v převodových poměrech od 7,5 do 100 (poměr n1/n2).

Obr. 4 Lineární osa s hřebenem AG.CR [30]

Parametry pohonu jsou určeny použitým motorem. Z toho důvodu je výčet vlastností neúplný. Výsledné vlastnosti budou v případě použití napočítány v kapitole věnované návrhu pohonů manipulátoru.

označení	zdvih [mm]	zrychlení [m/s^2]	opakovatelná přesnost [mm]	Fx [kN]	Fz [kN]	Mx [Nm]	průřez [mm]
AG.CR	>6000	-	-	-	6,4÷20	454÷1420	275x300

Příloha B: Cenový návrh vlastního manipulátoru

Varianta Beckhoff

položka	ks	cena/ks	cena celkem
lineární osa TEA technik	2	38000	76000
šneková převodovka	2	5000	10000
krokový motor	2	7336	14672
modul krokového motoru	2	5190	
zdroj	1	5000	5000
řízení Beckhoff	1	26096	26096
náklady spojené s provozem SW	1	9000	9000
elektroinstalace (pojízdná rozvodnice mimo M.)	1	30000	30000
vyráběné díly (kč/kg)	23	200	4600
koncáky, kolečka, vedení kabeláže, bižuterie	1	10000	10000
celkem			**CZK 185368**

Varianta cRIO

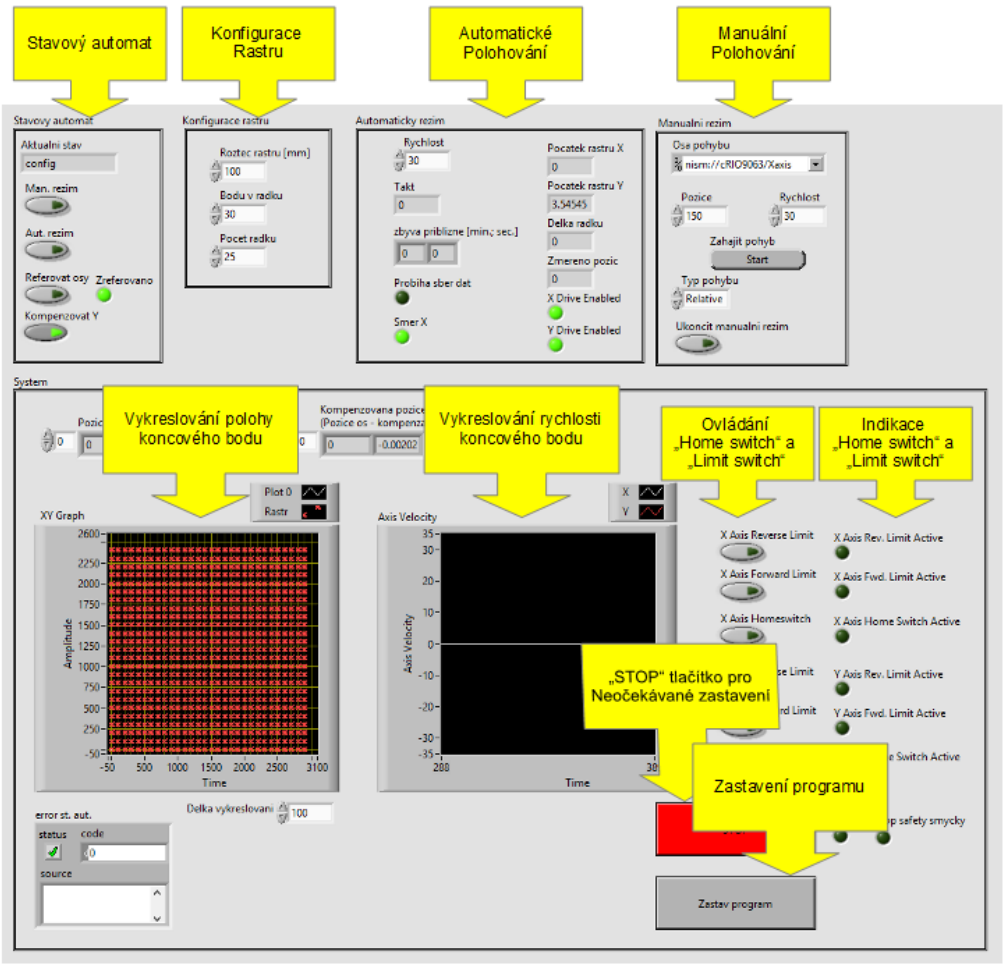
položka	ks	cena/ks	cena celkem	z pohledu Bobcat
lineární osa TEA technik	2	38000	76000	
šneková převodovka	2	5000	10000	
krokový motor	2	3500	7000	
driver motru	2	2100	4200	
zdroj	1	5000	5000	
řízení cRIO	1	30000	30000	-30000
cRIO moduly krokových motorů	2	15000	30000	
LV, SoftMotion module	1	60000	60000	-60000
elektroinstalace (pojízdná rozvodnice mimo M.)	1	30000	30000	
vyráběné díly (kč/kg)	23	200	4600	
koncáky, kolečka, vedení kabeláže, bižuterie	1	10000	10000	
celkem			**CZK 266800**	**CZK 176800**

Varianta Gravos

položka	ks	cena/ks	cena celkem
lineární osa TEA technik	2	38000	76000
šneková převodovka	2	5000	10000
krokový motor	2	2000	4000
driver motru	2	2100	4200
zdroj	1	5000	5000
řídící jednotka Gravos	1	10000	10000
sw Gravos	1	2000	2000
elektroinstalace (pojízdná rozvodnice mimo M.)	1	30000	30000
vyráběné díly (kč/kg)	23	200	4600
koncáky, kolečka, vedení kabeláže, bižuterie	1	10000	10000
celkem			**CZK 155800**

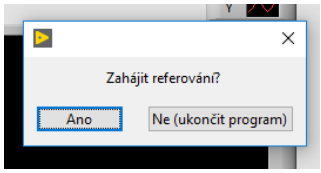
Příloha C: Uživatelská příručka řídícího programu manipulace

Uživatel řídícího programu manipulace ovládá program běžící v Real Time modulu cRIO průmyslového počítače skrz připojený osobní počítač a v něm spuštěnou ovládací obrazovku.



Obr. 5 Ovládací obrazovka

Po spuštění je vyžadováno potvrzení zahájení referování. Zreferování pohybových os je nutnou podmínkou ke korektnímu a plnohodnotnému chodu programu. Pokud uživatel odmítne referování, program se automaticky zastaví. Pokud je referování přerušeno, program sice pokračuje do stavu „config", ale není možné polohovat a je nutné znovu zahájit referování. K tomu slouží tlačítko „Referovat osy".

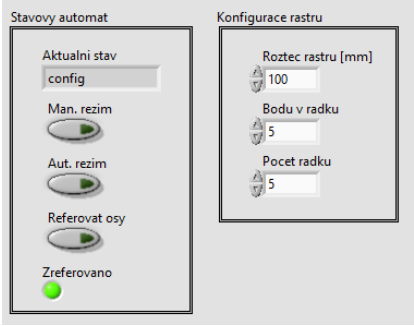


Obr. 6 Potvrzení referování

Po zreferování os se jejich poloha vynuluje a program se nachází ve stavu „config", kde je možné konfigurovat měřený rastr. Je možné nastavit parametry „rozteč rastru",

„bodů v řádku“ a „počet řádků“. Také je možné spustit manuální polohování (Manuální režim) pomocí tlačítka „Man. režim“ a tím rastr přesouvat uvnitř pracovního prostoru. Spuštěním automatického režimu pomocí tlačítka „Aut. režim“ pak je zahájeno polohování v nadefinovaném rastru. Po změření poslední měřené pozice se manipulátor vrací do výchozí polohy, ze které bylo zahájeno měření.

Při stisknutí tlačítka „STOP“ dojde k okamžitému přerušení pohybu (nezávisle na režimu/referování) a je vyžadováno potvrzení této skutečnosti ze strany obsluhy. Pokud řídící systém nezaznamená chybný stav, program se vrací do stavu „config“ a je možné opět zařízení provozovat. Pokud je při běhu programu vyhlášena chyba, program se dotazuje na další postup. Je možné buď program vypnout, anebo při potvrzení vymazání chyby je možné program opětovně spustit.



Obr. 7 Stav řídícího programu a konfigurace rastru