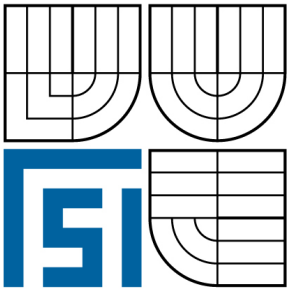


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ MANIPULÁTORU PRO LABORATORNÍ MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE

DESIGN AND CONTROL OF MANIPULATOR FOR LABORATORY MEASUREMENT OF TEMPERATURE
FIELD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MARTIN ČEPIČKA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2006/07

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Čepička Martin, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Inženýrská informatika a automatizace (3902T024)**

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

Návrh konstrukce a řízení manipulátoru pro laboratorní měření teplotního pole

v anglickém jazyce:

Design and control of manipulator for laboratory measurement of temperature field

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na odboru termomechaniky se již několik let zabývají modelováním proudění plynů v různých prostředí pro potřeby zpřesňování výpočetních metod. Jedním z jejich úkolů je modelování teplotního pole v uzavřené místnosti. Pro řešení tohoto úkolu potřebují realizovat jednoduchý manipulátor, který bude podle programu monitorovat teploty v různých místech zvoleného řezu místnosti a naměřené teploty zaznamenávat. Cílem práce je vytvořit software pro řízení tohoto manipulátoru.

Cíle diplomové práce:

Prostudujte problematiku měření teplotního pole (snímače, jak je používat) a dále problematiku jednoduchých plošných manipulátorů;
Navrhněte konstrukci manipulátoru a realizujte jeho kinematický model;
Navrhněte způsob řízení manipulátoru;
Řízení realizujte a simulačně ověřte na kinematickém modelu.

Seznam odborné literatury:

Brát V.: Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů; Academia, Praha 1981
www.maxonmotor.com
Pavelka J., Čeřovský Z., Javůrek J., Elektrické pohony, Nakladatelství ČVUT, Praha 2003
Skalický J., Elektrické servopohony, Nakladatelství VUT, Brno

Vedoucí diplomové práce:Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2006/07.

V Brně, dne 8.12.2006

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce a řízení jednoduchého manipulátoru pro měření teplotního pole. Jejím cílem je navrhnout model manipulátoru, vytvořit řídící software a simulačně jej ověřit. V práci je popsán návrh kinematického modelu a jeho simulačního ověření. K návrhu kinematického modelu bylo využito programovacího prostředí Matlab. Dále je popsán způsob návrhu konstrukce manipulátoru pomocí programu Autodesk Inventor Professional, ve kterém byly provedeny i dynamické a pevnostní analýzy manipulátoru, a který byl použit i pro tvorbu výrobních podkladů. Řízení manipulátoru je navrženo v programu LabVIEW. Tato aplikace bude později sloužit jako vstupní modul do komplexu měřící úlohy.

ABSTRACT

Diploma thesis is focused on design of construction of a simple manipulator. It will be used for laboratory measurement of temperature field. The goal is to design model of the manipulator, build up control software and verify by simulation. In thesis is described design of kinematical model, which was programmed in Matlab. Design of model was created in Autodesk Inventor Professional, which allows to conduct dynamic and compactness analysis of manipulator. The Autodesk Inventor Professional was also used for creating the productive documentation. Control of manipulator was design in program LabVIEW. This module will serve as input module to complex of measuring work.

KLÍČOVÁ SLOVA

Manipulátor, robot, model, řízení, motor, návrh modelu, plošný manipulátor.

KEYWORDS

Manipulator, robot, model, control, motor, design of model, surface manipulator.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

ČEPIČKA, M. ***Návrh konstrukce a řízení manipulátoru pro laboratorní měření teplotního pole*****. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma: „Návrh konstrukce a řízení manipulátoru pro laboratorní měření teplotního pole“, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Houšky, Ph.D., na základě dostupné literatury a dostupných informačních zdrojů, které jsem všechny odcitoval v seznamu použité literatury.

V Brně dne …… podpis……..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Pavlu Houškovi Ph. D., za odborné vedení, cenné podněty a rady při vypracování diplomové práce.

Obsah:

Zadání závěrečné práce……3
Abstrakt……5
Bibliografická citace……7
Prohlášení……9
Poděkování……11
1 Úvod 17
1.1 Cíle diplomové práce 17
2 Manipulátory 19
2.1 Rozdělení manipulátorů 19
2.1.1 Sériové roboty 19
2.1.2 Paralelní roboty 20
2.1.3 Kombinované roboty 21
2.1.4 Základní úlohy robotiky sériových i paralelních manipulátorů 21
2.2 Pohony 24
2.2.1 Servopohony se stejnosměrnými motory 24
2.2.2 Pohony s elektricky komutovanými motory 24
2.2.3 Pohony s asynchronními motory 26
2.2.4 Pohony se synchronními motory 26
2.2.5 Pohony s krokovými motory 27
2.3 Snímače polohy manipulátoru 28
2.3.1 Snímače polohy motoru 28
2.3.2 Snímače polohy pohonu 31
2.3.3 Snímaní koncového bodu ramene 31
2.4 Zhodnocení 31
2.5 Výběr vhodného software 31
3 Návrh mechaniky manipulátoru 33

3.1 Požadované parametry 33
3.2 Kinematický model 34
3.2.1 Pracovní prostor 34
3.2.2 Přímá úloha pro polohu 34
3.2.3 Nepřímá úloha pro polohu 36
3.2.4 Dosažení okrajové polohy 37
3.2.5 Dosažení polohy mezikruží 38
3.2.6 Dosažení bodu [0,0] 39
3.3 Návrh mechanické konstrukce manipulátoru 42
3.3.1 Základní části manipulátoru: 43
3.3.2 Uchycení pohonů 43
3.3.3 Dynamika manipulátoru 45
3.3.4 Pevnostní charakteristika vybraných součástí manipulátoru 46
3.3.5 Výběr pohonů 51
3.3.6 Mechanické parametry manipulátoru a zhodnocení konstrukce 55
4 Návrh řízení manipulátoru 57
4.1 Snímání polohy manipulátoru 57
4.1.1 Faktory ovlivňující přesnost 57
4.1.2 Kompenzace nepřesností snímače 57
4.2 Výběr vhodných nástrojů 57
4.3 Návrh způsobu řízení 59
5 Simulační ověření 61
6 Závěr 65
7 Použitá literatura 67
8 Seznam obrázků 69

9 Seznam příloh 71

1 ÚVOD

Na Odboru termomechaniky a techniky prostředí, Energetického ústavu se již několik let zabývají modelováním proudění plynů v různých prostředích pro potřeby zpřesňování výpočetních metod. Jedním z jejich úkolů je modelování teplotního pole v uzavřené místnosti.

V současné době je měření teplotního pole realizováno pomocí stojanu a měřící sondy na něj upevněné. V situaci, kdy chce obsluha měřit teplotní pole proudících plynů, má pouze možnost vypomoci si stojanem a několika měřicími sondami na něm upevněnými. Pro další rozšíření měřené oblasti je zapotřebí stojan se sondami přemístit a zaznamenat si údaj o poloze snímačů.

Tato metoda je zdlouhavá a velmi nepřesná. Proto oslovili Odbor Automatizace Ústavu automatizace a informatiky s žádostí o pomoc při řešení tohoto problému. Vzájemnou diskuzí bylo rozhodnuto o náhradě stávajícího měřícího pracoviště programovatelným manipulátorem, na kterém bude umístněna měřicí sonda. Následně byly stanoveny základní parametry manipulátoru a dohodnut časový plán realizace a další potřebné věci. Přínosem vyvíjeného manipulátoru bude zpřesnění a zrychlení měření teplotního pole.

Před začátkem práce mi byl vedoucím diplomové práce doporučen software Autodesk Inventor Professional. Tento software vyniká svými silnými nástroji na poli modelování a vytváření výkresové dokumentace. Lze zde využít dynamické a pevnostní analýzy k rychlému vývoji manipulátoru.

Samotné měření a vyhodnocování výsledků teplotního pole bylo doposud uskutečňováno pomocí počítače v programovém prostředí LabVIEW. Toto prostředí bylo vhodné zachovat a na stejném prostředí provést návrh řízení manipulátoru. Toto se od začátku jevilo jako nejlepší varianta pro realizaci řízení. Důvodem bylo sjednocení měřícího prostředí s prostředím řízení manipulátoru.

1.1 Cíle diplomové práce

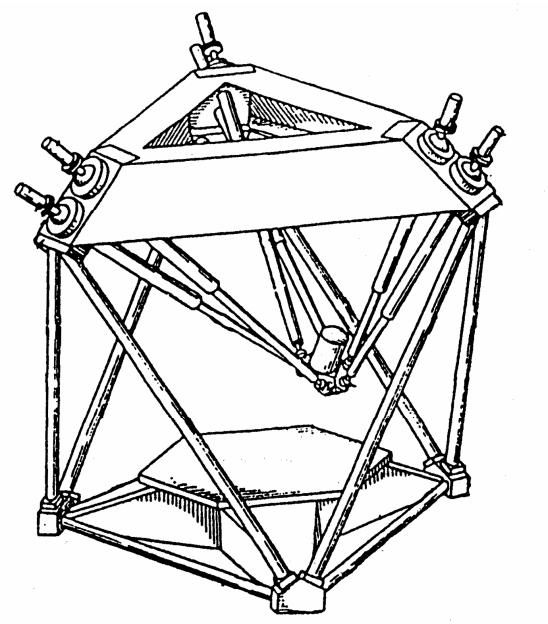
- Návrh konstrukce manipulátoru
- Realizace modelu
- Návrh způsobu řízení
- Realizace řízení a simulační ověření

2 MANIPULÁTORY

Tato kapitola vychází z [3], [5].

Tato kapitola by měla nastínit základní dělení manipulátorů a pohonů. Rozdělení manipulátorů dle použití a zhodnocení použitelnosti pro naši potřebu.

Průmysloví roboti se v praxi užívají již od šedesátých let 20-tého století, a to většinou jako mechanické manipulátory. V poslední době nacházejí mnoho jiných uplatnění, například jako letové simulátory, svařovací automaty, užívají se v lékařství, v kosmonautice, v televizní technice i jinde. Nové typy paralelních manipulátorů jsou tzv. hexapody Obr. 1, nachází stále větší uplatnění v praxi v důsledku některých mechanických předností, které tyto manipulátory mají (rychlost, přesnost, lepší dynamické vlastnosti). Robotika jako vědní obor je velmi mladou disciplínou, která zasahuje do mnoha vědních i technických oborů, bere si z nich potřebné poznatky a na druhé straně je obohacuje novými výsledky a metodami.



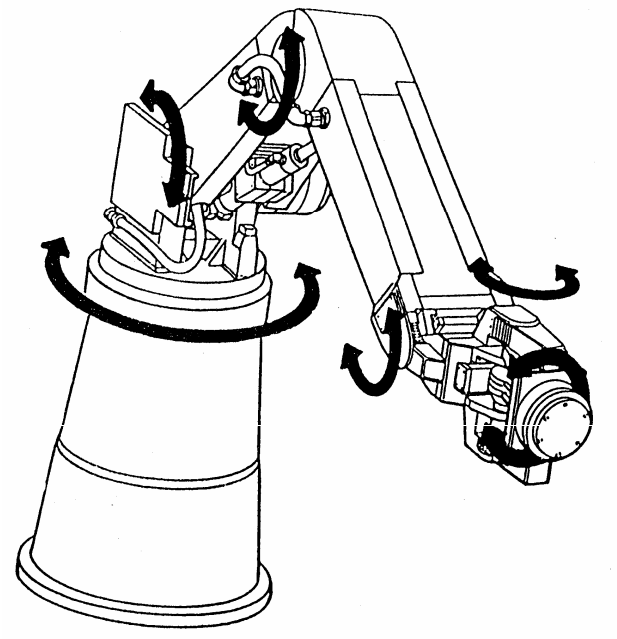
Obr. 1 Paralelní manipulátor, hexapod [3]

2.1 Rozdělení manipulátorů

Základní rozdělení robotů lze v současné době formulovat takto:

2.1.1 Sériové roboty

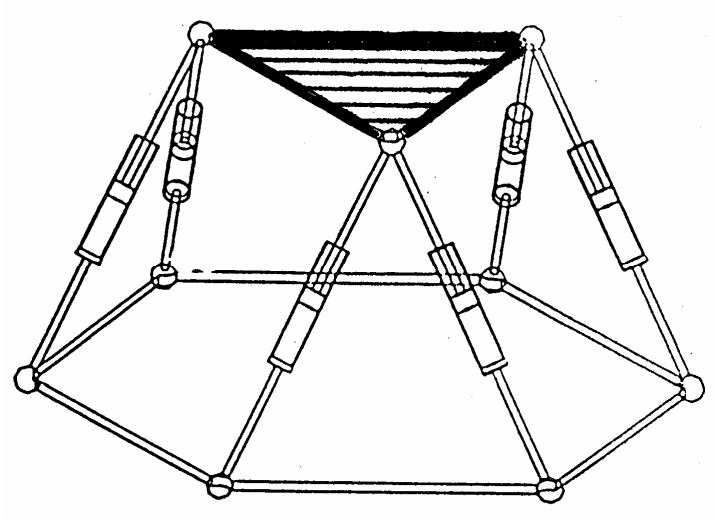
Roboty sériové (seriální), u kterých se výsledný pohyb skládá z na sebe navazujících pohybů (většinou elementárních), přičemž jednotlivé části se mohou pohybovat nezávisle na sobě. Na Obr. 2 vidíte schéma šestičlenného robota.



Obr. 2 Schéma šestičlenného robota [3]

2.1.2 Paralelní roboty

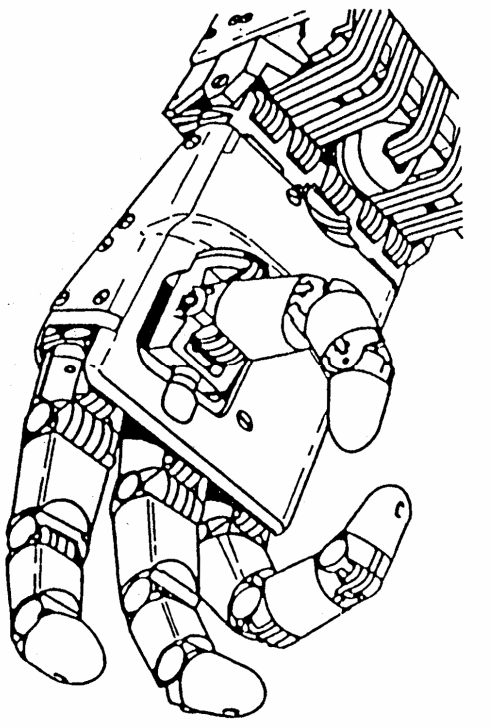
Paralelní roboty (manipulátory), kde jednotlivé části robota jsou zařazeny vedle sebe, a výsledný pohyb vzniká součinností všech částí. Pohyb jedné části ovlivňuje polohu všech ostatních. Příkladem může být letecký simulátor, jeho schéma je na Obr. 3



Obr. 3 Paralelní robot [3]

2.1.3 Kombinované roboty

Kombinované roboty, vznikají různými kombinacemi sériových a paralelních podstruktur, například chodící stroje, mechanické ruky (Obr. 4) a podobně.



Obr. 4 Mechanická ruka [3]

2.1.4 Základní úlohy robotiky sériových i paralelních manipulátorů

Z kinematického hlediska se robot skládá ze dvou mechanických soustav, pevné a hybné. Pevná soustava se nazývá báze a je pevně spojena s prostorem, ve kterém se pohyb odehrává. Hybná soustava je pevně spojena s nástrojem případně s členem, pomocí kterého robot vykonává výsledný pohyb (end-effector). Popis pohybu nástroje (end-effectoru) zprostředkovaného robotem je aplikací kinematiky a geometrie v robotice. Ukazuje se, že z tohoto hlediska je zásadní rozdíl mezi kinematickým popisem sériového robota a paralelního manipulátoru, proto se jimi budeme zabývat odděleně.

- Přímá úloha pro polohy – ze známé vzájemné polohy členů robota najít polohu nástroje nebo efektoru. V případě sériového robota je vzájemná poloha členů robota určena vzdálenostmi a úhly jejich os, v případě paralelního manipulátoru známe délky jednotlivých teleskopických ramen.

- Obrácená úloha pro polohy – známe předpokládanou polohu nástroje nebo efektoru a hledáme odpovídající „nastavení“ členů robota.

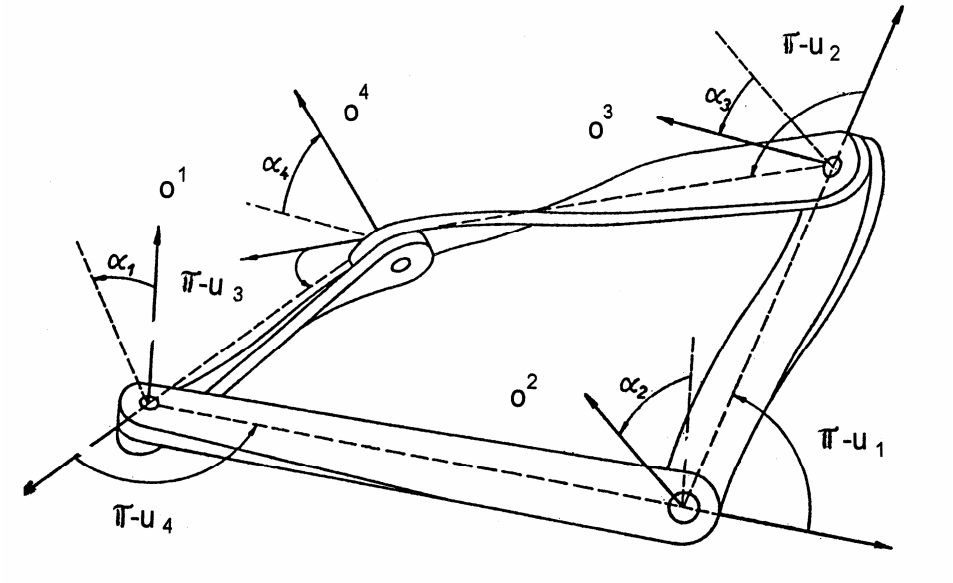
- Přímá úloha pro rychlosti – známe relativní rychlosti pohybu jednotlivých členů robota a chceme najít operátor rychlosti v prostoru nástroje nebo efektoru.

- Obrácená úloha pro rychlosti – známe operátor rychlosti v prostoru nástroje nebo efektoru a chceme určit rychlosti pohybu jednotlivých členů robota nebo manipulátoru.

Přímá a nepřímá úloha pro rychlosti se zdá být zbytečná, protože teoreticky vzato ji můžeme řešit derivováním úlohy pro polohu. Uvidíme však později, že úloha pro polohy je obvykle velice obtížná a je snadnější najít operátor rychlosti ze znalosti pouze jedné polohy robota nebo manipulátoru a ze znalosti relativních rychlostí jednotlivých členů. Takto formulovaná úloha je mnohem jednodušší, protože jak uvidíme je lineární, zatímco při řešení úlohy pro polohu musíme řešit algebraické rovnice vyšších stupňů a ve většině případů řešení stejně neumíme zapsat v explicitním tvaru.

S uvedenými základními úlohami jsou spojeny další problémy. Některé z nich mají čistě geometrický charakter. Jednou z nich je problém tzv. singulárních poloh robota nebo manipulátoru, tj. poloh, ve kterých je operátor rychlosti singulární a není tedy možné jednoznačně řešit úlohy o rychlostech.

Další zajímavou otázkou je problém tzv. vlastních pohybů robota. Vlastní pohyby sériového manipulátoru jsou pohyby členů robota, při nichž báze a nástroj zůstává na místě a vzájemně se pohybují jednotlivé členy robota. Takové pohyby existují u sériových robotů s více než šesti členy vždycky a dají se využít ke změně konfigurace robota. Zajímavější je otázka, zda takové pohyby mohou existovat i u robotů s šesti nebo méně členy. Pro čtyřčlenné roboty existuje tzv. Bennettův mechanismus (Obr. 5) jako jediný čtyřčlenný uzavřený mechanismus, který se může pohybovat (kromě sférických mechanismů, kde je otázka triviální). U pětičlenných robotů je to větší třída mechanismů, jsou to tzv. Goldbergovy mechanismy a ještě některé další, jsou všechny známy. V případě šestičlenného uzavřeného mechanismu jsou známy pouze některé případy, obecného řešení zůstává jedním z otevřených problémů mechaniky.



Obr. 5 Bennettův mechanismus [3]

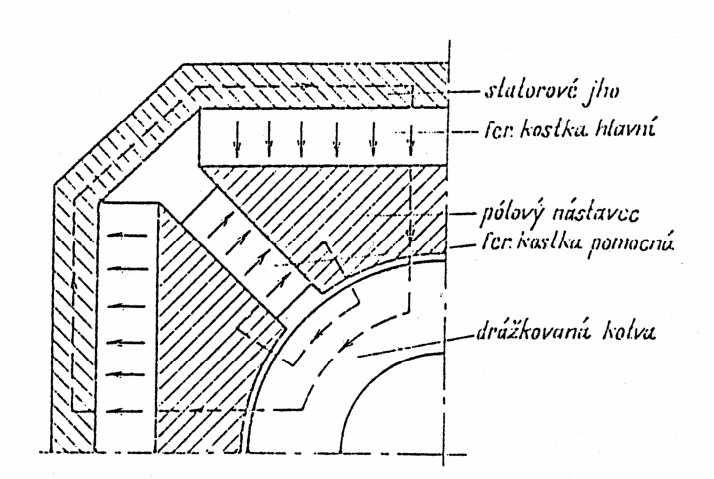
U paralelních robotů jsou vlastní pohyby charakterizovány jako pohyby, u kterých je délka teleskopických ramen konstantní a manipulátor přesto má jeden nebo více stupňů volnosti. Takové případy jsou pro praxi nežádoucí, protože paralelní manipulátor v takové poloze není možné řídit. Otázka nalezení vlastních pohybů paralelních manipulátorů je otázkou nalezení všech pohybů v prostoru, které mají alespoň šest sférických trajektorií. Touto otázkou se zabývali A. Borel a R. Bricard na začátku minulého století. Jsou známy velice zajímavé příklady takových pohybů, ale otázka jejich klasifikace zůstává otevřenou otázkou nejen v mechanice, ale i v geometrii.

2.2 Pohony

2.2.1 Servopohony se stejnosměrnými motory

Stejnosměrný motor patří k nejstarším elektrickým strojům. Vždyť první elektrické rozvody byly stejnosměrné a prvními byla stejnosměrná dynama poháněna parními stroji. Stejnosměrný motor je ideální regulačním motorem – jeho otáčky lze plynule měnit změnou přiváděného napětí.

Pro servopohony se používá zejména stejnosměrných motorů s buzením permanentními magnety ve statoru. Pro magnety se používá magneticky tvrdých materiálů, zejména feritů a spékaných materiálů ze vzácných zemin, např. samarium-kobaltu nebo sloučeniny neodymu, železa a bóru. Aktivními částmi stejnosměrného motoru jsou stator se jhem, permanentními magnety a pólovými nástavci z měkkého železa pro koncentraci magnetického toku do vzduchové mezery, rotor (kotva) s vinutím, tvořeným jednotlivými cívkami, uloženými v drážkách a vyvedenými na komutátor, který spolu s uhlíkovými kartáči a kartáčovými drážky tvoří tzv. sběrací ústrojí. Řez stejnosměrným motorem s permanentními magnety je na Obr. 6



Obr. 6 Řez stejnosměrným motorem [5]

Kromě motorů s permanentními motory se zejména pro větší výkony používá motorů s cizím buzením, v nichž se magnetické pole vytváří proudem budícího vinutí, navinutém na tzv. hlavních (budících) pólech statoru. Nevýhoda těchto motorů – větší ztráty a Joulovy ztráty v budícím vinutí – je na druhé straně vykompenzována možností regulace odbuzováním.

2.2.2 Pohony s elektricky komutovanými motory

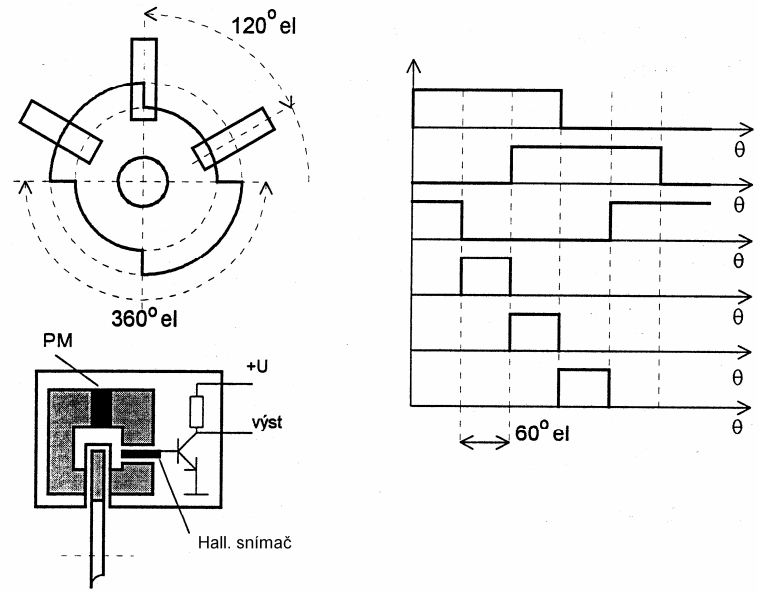
Stejnosměrný motor, který byl až donedávna (přibližně do r. 1980) jediným typem elektromotoru. Je vhodný pro polohové servomechanismy z důvodu jednoduchého řízení rychlosti napětím kotvy má i řadu nevýhod, plynoucích z použití z kluzného kontaktu mezi komutátorem a sběracími kartáči. Sběrací ústrojí vyžaduje pravidelnou údržbu (čištění komutátoru, výměnu a zabrušování kartáčů), při vyšších otáčkách je vyšší napětí mezi

jednotlivými lamelami komutátoru, které při větších proudech způsobuje jiskření a pokud by proud nebyl omezen, mohlo by toto jiskření způsobit kruhový oblouk na komutátoru. Další nevýhodou stejnosměrného motoru s permanentními magnety ve statoru je, že všechny ztráty, tj. jak Jouleovy ve vinutí kotvy, tak v železe kotvy a na komutátoru, vznikají v rotoru. Vzhledem k tomu že servomotory se vyrábějí jako zavřené bez přístupu chladicího vzduchu, teplo se odvádí vedením přes stator a kostru a dále i přes hřídel motoru a spojku, čímž se otepluje např. velmi přesný pohonný mechanismus, jakým jsou kuličkové šrouby posuvů pracovních strojů.

Elektricky komutovaný motor je v podstatě „obrácený“ stejnosměrný motor, proto se někdy nazývá bezkomutátorovým stejnosměrným motorem. Zatímco klasický stejnosměrný motor má magnety ve statoru a vinutí na rotoru, elektricky komutovaný motor má magnety na rotoru a vinutí na statoru. Funkci komutátoru přebírá tranzistorový měnič, který podle polohy rotoru přepíná proud do jednotlivých statorových vinutí.

Součástí motoru je snímač polohy rotoru, nejčastěji magnetický nebo fotoelektrický. Princip Hallova snímače polohy rotoru pro čtyřpólový stroj je nakreslen na Obr. 7, na němž jsou i průběhy tří výstupních signálů, jejichž dalším zpracováním v logických obvodech dostaneme povely pro komunikaci proudu pro tři statorová vinutí.

Pro otáčkovou zpětnou vazbu je vestavěno ve stroji bezkartáčové elektronicky komutované tachodynamo, aby byla důsledně dodržena koncepce bezkontaktního provedení, které nevyžaduje údržbu a je podstatně spolehlivější. Bezkartáčové tachodynamo je opět elektronicky komutovaný stroj s permanentními magnety na rotoru, orientovanými souhlasně a s dostatečnou přesností s úhlovou polohou magnetů vlastního motoru.



Obr. 7 Hallův snímač polohy elektricky komutovaného motoru [5]

2.2.3 Pohony s asynchronními motory

Asynchronní motor je nejrozšířenějším typem motoru používaným pro pohony pracovních strojů. Zejména asynchronní motor s rotorem nakrátko vyniká jednoduchou konstrukcí, je robustní, spolehlivý a vyrábí se hromadně v unifikovaných řadách a v přijatelných cenových relacích.

S nástupem výkonové elektroniky v posledních desetiletích byla překonána v podstatě jediná nevýhoda těchto motorů – obtížnost regulace otáček. V současné době probíhá renesance asynchronních motorů v důsledku jejich používání v pohonech s regulací rychlostí, polohy, točivého momentu, případně i jiné veličiny technologického procesu.

Asynchronní motory pro servopohony mívají namontovány snímače otáček, případně polohy.

2.2.4 Pohony se synchronními motory

Synchronní motor je elektrický stroj, jehož rotor se otáčí synchronně s otáčením točivého magnetického pole statoru. Stator je shodný se statorem asynchronního motoru, tj. listěný, s drážkami pro uložení statorového vinutí. Vinutí je zpravidla třífázové, rozložené do statorových drážek a podle konstrukce může být dvoupólové nebo více pólové.

Rotor může být hladký nebo s vyjádřenými póly, které mohou být opatřeny budícím vinutím, napájeným stejnosměrným proudem. Budící proud se do rotorového vinutí přivádí buď pomocí kluzných kartáčů (kartáčů a kroužků), nebo bezkontaktně rotačním transformátorem a následným usměrněním diodami na rotoru tzv. tlumící vinutí, které může sloužit pro asynchronní rozběh motoru.

Pro servopohony se používá synchronních motorů buzených permanentními magnety na rotoru. Konstrukčně se synchronní motor s permanentními magnety na rotoru podobá elektricky komutovanému motoru. Magnety mohou být umístěny na povrchu rotoru buď jako zapuštěné (v tom případě je méně potlačen vliv tzv. reakce statorového vinutí na tvar pole ve vzduchové mezeře), nebo na povrchu rotoru, což představuje umístění vzduchové mezeře (výhodou je potlačení vlivu reakce statorového vinutí vlivem velké vzduchové mezery, neboť permanentní magnety mají prakticky stejnou permeabilitu jako vzduch).

Jako materiálu pro výrobu permanentního magnetu se používá vzácných zemin, jako jsou např. samarium – kobalt nebo neodym – železo – bor, případně i tvrdých feritů, které jsou levnější avšak s horšími magnetickými vlastnostmi.

Významným rozlišením synchronních motorů od motorů s elektrickou komutací je použitý princip snímání polohy rotoru pro účely řízení tranzistorového měniče, napájecího statorové vinutí: zatímco elektricky komutovaný motor vyžadoval pouze diskrétní snímání vždy po 60 el. stupních, synchronní motor potřebuje trvalou informaci o poloze rotoru. Nejpoužívanějším snímačem polohy rotoru je selsyn (resolver).

Dalším konstrukčním prvkem synchronních servomotorů bývá snímač teploty statorového vinutí (termistor) pro ochranu motoru před trvalým přetěžováním a

elektromagnetická klidová brzda, jejímž účelem je zabezpečit klidový stav motoru bez napájení, případně i havarijní zabrzdění motoru při poruše regulátoru nebo při výpadku síťového napájecího napětí.

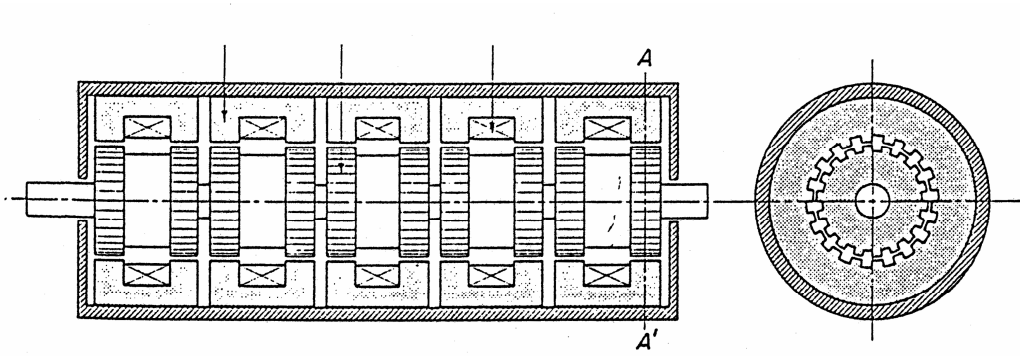
Synchronní servomotory s permanentními magnety na rotoru jsou nejrozšířenějším typem motorů pro polohové servomechanismy výrobních strojů, robotů a v automatizační technice. Oproti asynchronním motorům jsou menší a lehčí při stejném výkonu, lépe se chladí (na rotoru nevznikají ztráty a není tedy potřeba odvádět teplo z rotoru), ve srovnání s elektricky komutovanými motory se vyznačují vyšší rovnoměrností chodu bez momentových pulsací. Snímač polohy rotoru lze pochopitelně využít i pro polohovou zpětnou vazbu při polohovém řízení servopohonu.

2.2.5 Pohony s krokovými motory

Krokový motor je nejjednodušším akčním členem pro převádění digitálního signálu na polohu – úhel natočení rotoru. V principu si můžeme krokový motor představit jako synchronní stroj, v němž místo točivého pole, generovaného třífázovým sinusovým napájecím napětím statorového vinutí, je generováno „poskakující“ magnetické pole postupným napájením jednotlivých pólových dvojic stejnosměrným proudem. Počet stabilních poloh rotoru je pak dán počtem kroků motoru na jednu otáčku.

Pohon s krokovým motorem je jediným typem pohonu, který může nastavovat polohu bez zpětné vazby od odměřování polohy, zajistíme-li, že každý zadaný krok je motorem vykonán. Typickými aplikacemi krokových motorů jsou pohony periferních zařízení počítačů, jako jsou diskové paměti, tiskárny a plotry, dále pohony digitálních hodinek, z průmyslových aplikací to jsou např. servomechanismy nastavování polohy souřadnicových stolů pro vrtání plošných spojů, malé manipulátory a roboty pro bezobslužné výrobní stroje a podobně.

Na Obr. 8 je nakreslen řez pětifázovým krokovým motorem. Tento motor vykoná 100 kroků na jednu otáčku.



Obr. 8 Axiální pětifázový reluktanční krokový motor [5]

2.3 Snímače polohy manipulátoru

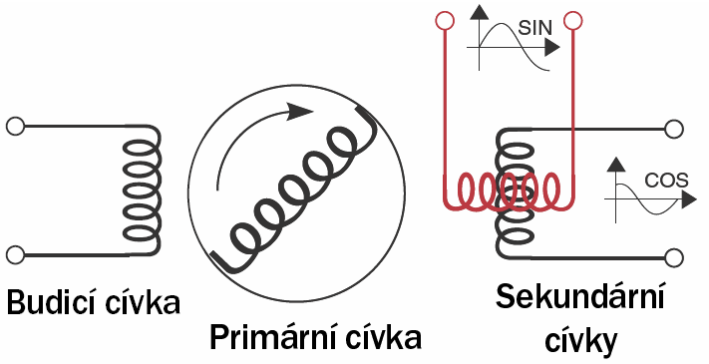
Tato kapitola vychází z [15], [16], [17], [18], [19]

2.3.1 Snímače polohy motoru

Resolver

Resolver se používal převážně u analogových řídicích jednotek. Skládá se z jedné budící cívky, z cívky umístěné v rotoru a ze dvou sekundárních cívek umístěných ve statoru. Sekundární cívky jsou vzájemně natočeny o 90°.

Budící cívka je buzena externím zdrojem napětí a indukuje napětí do cívky umístěné v rotoru. Na sekundárních cívkách je díky vzájemnému pootočení o 90° sinusový a kosinusový průběh výstupního napětí, který je závislý na natočení rotoru. Resolver poskytuje přesnou informaci o poloze i rychlosti rotoru. Elektrické schéma resolveru je na Obr. 9.



Obr. 9 Elektrické schéma revolveru [19]

Rotační inkrementální snímače

Rotační inkrementální snímač je elektromechanický převodník, který převádí rotační pohyb na sekvence elektrických digitálních impulzů. Realizují se pomocí kotouče se značkami a snímací částí. Výstup snímací části se mění v závislosti na přítomnosti / nepřítomnosti značky.

V praxi se nejčastěji používají dva principy - kotouč s otvory (optický detektor) nebo kotouč s permanentními magnety (Hall snímač)

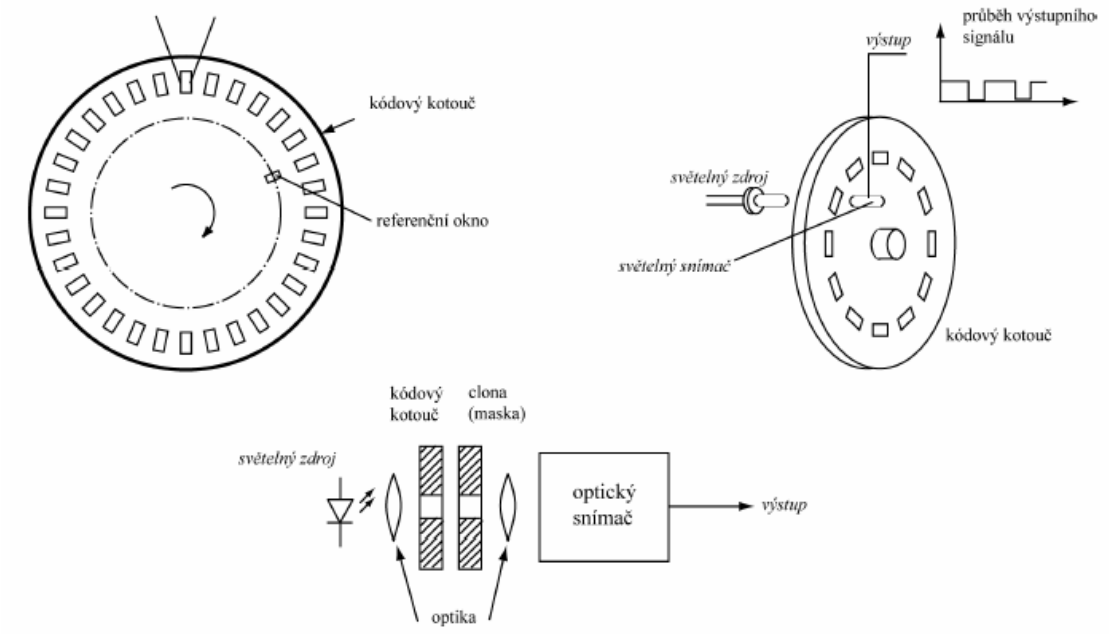
Optický snímač

Princip funkce optického snímače spočívá v clonění světelného paprsku mezi zdrojem světla (nejčastěji dioda) a fotocitlivým detektorem, tvořeným fotodiodou, nebo fototranzistorem.

Ke clonění se používá rotující disk, který je pevně spojen s hřídelí snímače. Rotující disk má po vnitřním obvodu disku štěrbiny, kterými buď světlo prochází do detektoru, nebo je cloněno. Při otáčení dochází k pravidelnému přerušování světelného toku. Jako výstupní signál z fotocitlivého prvku jsou pak elektrické impulzy. Výsledné natočení je pak dáno obsahem čítače, který inkrementuje tyto impulzy. Princip snímače je znázorněn na Obr. 10. Přesnost, neboli rozlišení snímače je dáno počtem štěrbin po obvodu disku.

Pro snímání polohy a směru rychlosti se používají dvoukanálové snímače. Ty mají dvě optické soustavy se dvěma výstupními kanály A a B, které jsou od sebe vzájemně posunuty o 90 elektrických stupňů. Směr otáčení lze rozeznat podle sekvence stavů generovaných oběma kanály.

Tříkanálové snímače, jsou v podstatě dvoukanálové snímače, ke kterým je přidán ještě jeden kanál, ten je nazýván jako nulový a označován písmenem Z. Tento kanál udává referenční (nulovou) polohu snímače, jeho signál je ve fázi s kanálem A. Impulz je proveden vždy jednou za otáčku

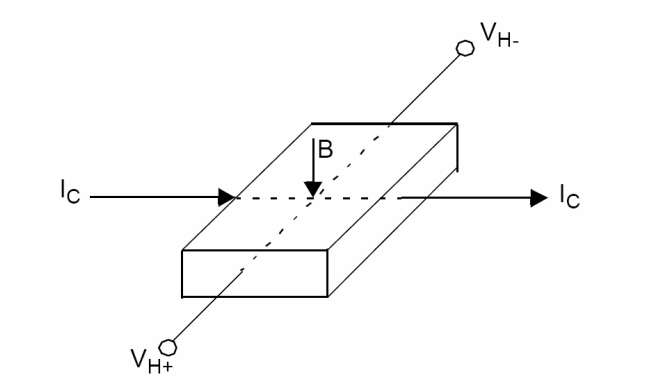


Obr. 10 Princip činnosti optického inkrementálního snímače [15]

Snímač založený na Hallově jevu

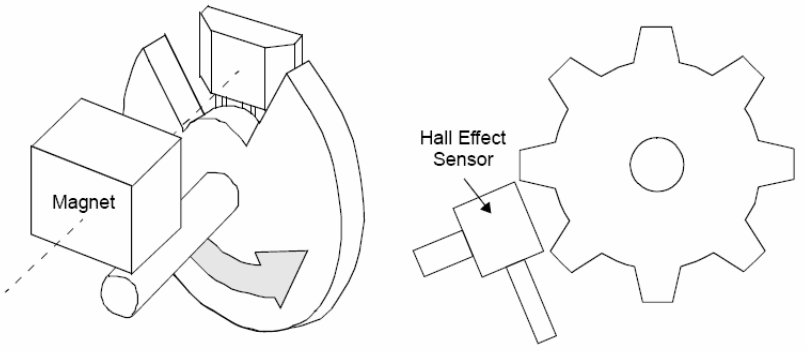
Další typ snímačů, které jsou schopny snímat polohu (a rychlost), jsou snímače, které jsou založeny na Hallově jevu. K Hallově jevu dochází tehdy, pokud se vodič, kterým protéká stejnosměrný proud, nachází v magnetickém poli kolmém na tento vodič. Potom dochází k tomu, že se volné nosiče elektrického proudu ve vodiči vychylují z podélného směru a jsou vytlačovány k okraji. Příčinou této odchylky je elektromagnetická Lorentzova síla. Mezi okraji vodiče se tedy vytvoří rozdíl potenciálů, kolmý na směr

proudu. Na Obr. 11 je Hallův snímač, na kterém je vidět směr průchodu proudu I_C a Hallovo napětí V_H.



Obr. 11 Hallův jev [16]

Na Obr. 12 jsou zobrazeny dva typy Hallových snímačů, vlevo je zobrazen snímač, který je schopen měřit pouze otáčky. Na jeho výstupu je pouze jeden impulz na otáčku. V praxi se ale tyto snímače používají i s větším počtem výřezů, takže je možné snímat i polohu. Tento typ snímače pracuje tak, že mezi magnetem a snímačem rotuje disk, který obsahuje výřezy. Pokud je mezi magnetem a snímačem tělo rotujícího disku, obvod se rozladí. Impulzy jsou generovány při každém průchodu výřezu mezi magnetem a snímačem. Na Obr. 12 vpravo je zobrazen snímač, u něhož se mění vzduchová mezera mezi Hallovým snímačem a rotujícím diskem.



Obr. 12 Dva různé typy Hallových snímačů [16]

Každá taková změna má za následek vygenerování pulsu na výstupu snímače. Tento typ snímače je schopen měřit i natočení hřídele, jeho přesnost je ale menší než u optických snímačů. V praxi se používají i snímače, které pracují tak, že na obvodu kotouče (nebo na pásce v případě snímání polohy) jsou po stejně velkých úsecích rozmístěny magnetické domény, které jsou pak Hallovým snímačem detekovány.

2.3.2 Snímače polohy pohonu

V předchozí kapitole jsem nastínil problematiku snímačů polohy pro motory. Snímání polohy pohonů je principiálně stejné.

2.3.3 Snímaní koncového bodu ramene

Jelikož bude v návrhu použito relativního snímání polohy manipulátoru, nebudu se touto problematikou v této práci zabývat.

2.4 Zhodnocení

Nejvýhodnější variantou pro návrh manipulátoru pro naši potřebu z výše provedené analýzy vyšel nejlépe dvouramenný sériový manipulátor. Pohon manipulátoru byl vybrán stejnosměrný servomotor s inkrementálními snímači polohy. Koncové snímače se do budoucna zatím neuvažují a nejsou ani zobrazeny v modelu manipulátoru.

Veškerý výběr byl proveden s ohledem na finanční možnosti zadavatele a rozměry možných řešení. Motory pak pro jednoduchou řiditelnost.

2.5 Výběr vhodného software

Software byl vybírán s ohledem na zadání úlohy. Kinematický model bylo vhodné vytvořit v programu *Matlab* [11].

Pro samotný model manipulátoru byl vybrán software *Autodesk inventor professional* [6] , který vyniká svými schopnostmi produktivního návrhu mechanické části. Jeho silnou zbraní jsou implementované moduly *dynamické a pevnostní analýzy*, díky kterým není třeba výsledky dosažené v různých modulech nijak převádět a dá se s nimi pracovat přímo.

Výběr software pro řízení byl daný požadavkem zadavatele, který požadoval řízení pomocí *LabVIEW* [10].

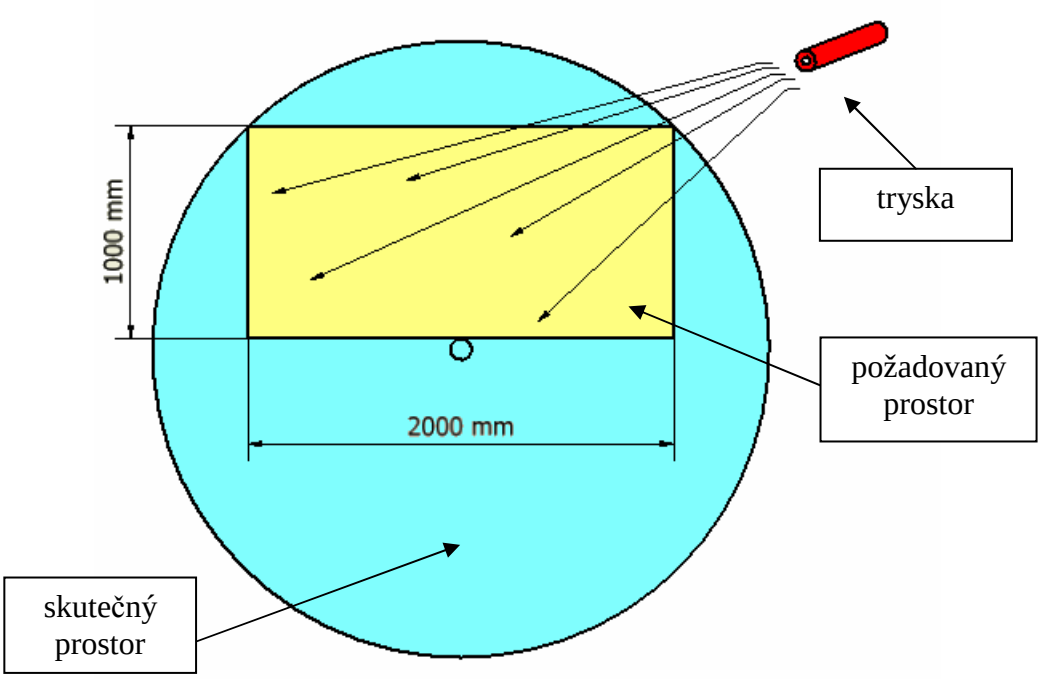
3 NÁVRH MECHANIKY MANIPULÁTORU

3.1 Požadované parametry

Zadavatelem určené parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1). Pracovní prostor je daný a vychází z potřeb zadavatele. Požadovaná přesnost vyplývá z potřeb měření. Nosností se rozumí maximální zatížení manipulátoru na jeho konci (hmotnost efektoru). Je zde počítáno i s vlivem proudění, které je do zatížení konce manipulátoru započítáno [9].

Tab. 1. Požadované parametry

pracovní prostor	1000 x 2000 mm
požadovaná přesnost	0,1 mm
nosnost	0,5 kg
konstrukce	Dvouramenný manipulátor



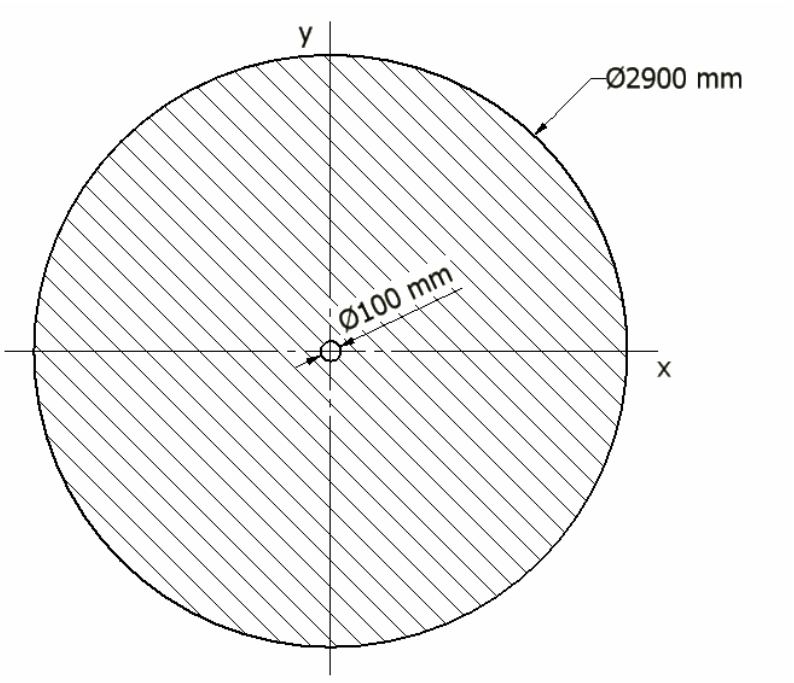
Obr. 13 Pracovní prostor

3.2 Kinematický model

Pro naše potřeby uvažujeme případ sériového manipulátoru se dvěma klouby a dvěmi rameny.

3.2.1 Pracovní prostor

Pracovní prostor manipulátoru je takový prostor, kde může „ruka“ manipulátoru operovat. Na Obr. 14 je pracovní prostor znázorněn graficky. Tento prostor je omezen dvěmi kružnicemi. Venkovní kružnice vznikne při narovnání obou ramen do polohy, kdy vzdálenost od bodu počátku a koncového bodu je maximální vzdálenost. Následnou rotací vznikne tato kružnice. Vnitřní kružnice vznikne, když je koncové rameno otočeno o 180° oproti předchozímu případu. Toto má za následek rozdílná délka ramen. V případě, že by manipulátor obsahoval pohony, ať z jakéhokoliv důvodu, s dorazem nebo kdyby měl manipulační prostor nějaké omezení, pak by tento prostor měl jiný tvar. Pracovní prostor je závislý na délce ramen. Délka *ramene b* byla navržena na 700 mm a délka *ramene a* na 750 mm (Obr. 15).



Obr. 14 Pracovní prostor manipulátoru

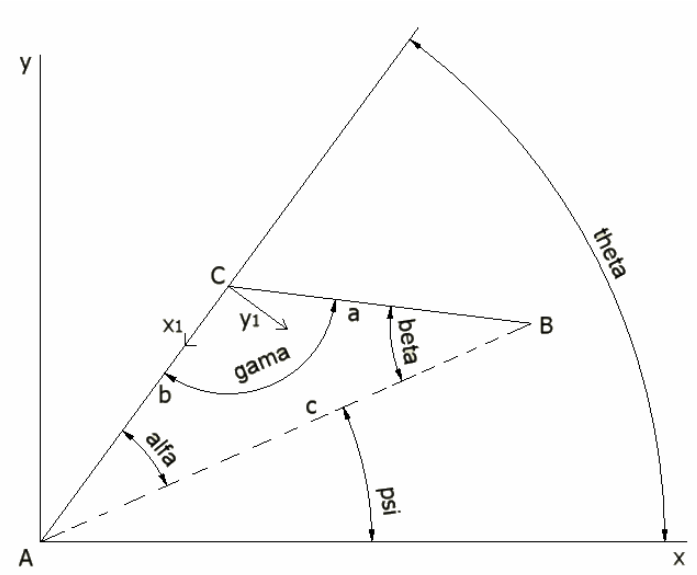
3.2.2 Přímá úloha pro polohu

V případě našeho manipulátoru je vzájemná poloha členů manipulátoru určena vzdálenostmi a úhly jejich os. To znamená, že ze známé vzájemné polohy členů manipulátoru hledáme polohu efektoru [3].

Na Obr. 15 můžeme vidět zjednodušený model manipulátoru, který se skládá ze dvou ramen. První rameno *rameno b* je spojeno s počátkem rotační vazbou. Druhé rameno *rameno a* je spojeno rotační vazbou s prvním ramenem *rameno b*. Úhly α, β, γ jsou

vnitřními úhly pomyslného trojúhelníku, který vznikne z ramen „*a*“ a „*b*“ a spojením koncového bodu a počátku. Této skutečnosti je využíváno při výpočtech a lze tak užít Kosinovy věty:

$$\cos\alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c} \tag{1}$$



Obr. 15 Zjednodušený model manipulátoru

Dalšími důležitými úhly pro výpočet jsou úhel θ a úhel ψ. Úhel θ udává natočení prvního ramene *rameno b* od osy *x*. Výpočet je prováděn v kartézských souřadnicích. Úhel ψ nám udává natočení pomyslné strany *c*. Strana *c* se jednoduše vypočítá takto:

$$\psi = \theta - \alpha \tag{2}$$

Na Obr. 15 můžeme také vidět 3 důležité body. Bod $A[x, y]$, který je počátečním bodem o souřadnicích $A[0,0]$. Další bod $B[x, y]$, který představuje konečný bod manipulátoru a v neposlední řadě bod $C[x, y]$, který představuje spojení obou ramen rotační vazbou.

Výsledkem výpočtu koncového bodu $B[x, y]$ jsou souřadnice ve směru x a ve směru y:

$$\begin{aligned} B(x) &= c \cdot \cos(\psi) \\ B(y) &= c \cdot \sin(\psi) \end{aligned} \tag{3}$$

Abychom mohli použít předchozí rovnici, musíme zjistit velikost úhlu α a to uděláme takto:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c}\right) \tag{4}$$

Délka strany c je prozatím neznámá, proto ji můžeme vypočítat z následující rovnice:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(\gamma)} \tag{5}$$

Dalším potřebným výpočtem pro definování polohy manipulátoru je bod $C[x, y]$. K jeho výpočtu nám postačí znalost délky ramene (*rameno b*) a úhlu θ:

$$\begin{aligned} C(x) &= b \cdot \cos(\theta) \\ C(y) &= b \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \tag{6}$$

Těmito rovnicemi jsme schopni popsat polohu manipulátoru za předpokladu znalosti délek obou ramen a úhlů θ, γ.

3.2.3 Nepřímá úloha pro polohu

Ze znalosti předpokládané polohy efektoru hledáme odpovídající „nastavení“ členů manipulátoru [3].

Nepřímá úloha je o něco komplikovanější oproti úloze přímé, a to z toho důvodu, že může nastat více řešení. Proto je potřeba od začátku výpočtu na tuto skutečnost brát zřetel.

Pro výpočet nastavení polohy manipulátoru v nepřímé úloze potřebujeme znát pouze požadovaný bod $B[x, y]$ a délku ramen. Z následujícího vzorce jsme schopni vypočítat délku fiktivní strany c a tím dostaneme trojúhelník definovaný třemi stranami (a, b, c).

$$c = \sqrt{B(x)^2 + B(y)^2} \tag{7}$$

Úhel ψ, který svírá stranu c a osu x, se dá vypočítat pomocí následující rovnice:

$$\psi = \arctan\left(\frac{B(y)}{B(x)}\right) \tag{8}$$

Je třeba pamatovat na fakt, že funkce arkus tangens je v rozsahu (0 až π) a je třeba k výslednému úhlu připočítat patřičný doplněk pro patřičný kvadrant.

Opět můžeme použít Kosinovu větu pro výpočet vnitřních úhlů, kde nám postačí tyto dva. Úhel α:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2)}{2 \cdot b \cdot c}\right) \tag{9}$$

a úhel γ:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2 \cdot a \cdot b}\right) \tag{10}$$

Tento postup je zatím stejný pro všechna řešení. Více řešení zaznamenáme ve chvíli, kdy budeme chtít zjistit úhel θ. Ten můžeme vypočítat dle následujícího vzorce:

$$\theta_1 = \psi + \alpha \tag{11}$$

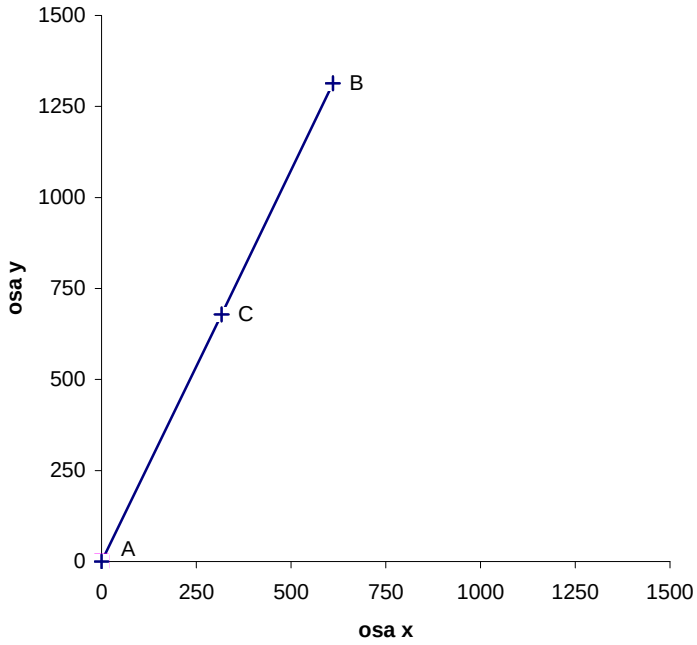
ale také takto:

$$\theta_2 = \psi - \alpha \tag{12}$$

3.2.4 Dosažení okrajové polohy

V tomto případ nastane jen jedno možné řešení, jak lze vidět na Obr. 16. Toto nastane v případě, že obě ramena jsou rovnoběžná. Zpřesňující matematický zápis by mohl vypadat takto:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_1 = \theta_2 = \psi \\ \gamma &= \pi \end{aligned} \tag{13}$$



Obr. 16 Jedno řešení

Manipulátor je v této poloze maximálně napřímen a dosahuje na samotný okraj pracovního prostoru. Pokud bychom potřebovali znát polohu bodu $C[x, y]$, můžeme ji vypočítat takto:

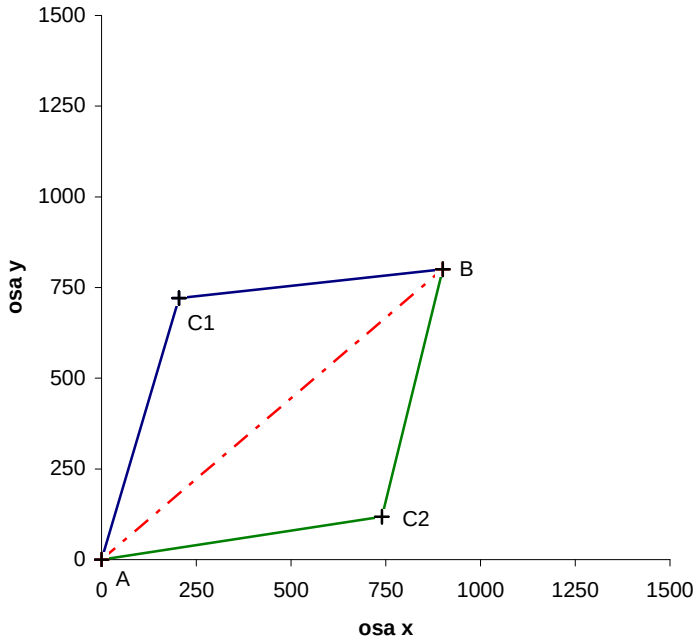
$$\begin{aligned} C(x) &= b \cdot \cos(\theta) \\ C(y) &= b \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \tag{14}$$

3.2.5 Dosažení polohy mezikruží

Bude-li platit následující rovnice:

$$\theta_1 \neq \theta_2 \tag{15}$$

bude mít výpočet dvě možná řešení. Názorné zobrazení tohoto případu nám ukazuje Obr. 17. Modře je zobrazeno 1. řešení, zeleně 2. řešení a červeně je naznačena osa souměrnosti.



Obr. 17 Dvě možná řešení

Výpočet bodu $C[x,y]$ bude podobný jako v předchozím řešení pouze s tím rozdílem, že dostaneme tyto dva body. Bod $C_1[x,y]$ a bod $C_2[x,y]$.

Úhel θ_1 a θ_2 vypočítáme tak, že jednou přičteme a podruhé odečteme vnitřní úhel α:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \psi + \alpha \\ \theta_2 &= \psi - \alpha\end{aligned} \tag{16}$$

A body $C_1[x,y]$ a $C_2[x,y]$ následujícím způsobem:

$$\begin{aligned}C_1(x) &= b \cdot \cos(\theta_1) \\ C_1(y) &= b \cdot \sin(\theta_1) \\ C_2(x) &= b \cdot \cos(\theta_2) \\ C_2(y) &= b \cdot \sin(\theta_2)\end{aligned}. \tag{17}$$

3.2.6 Dosažení bodu [0,0]

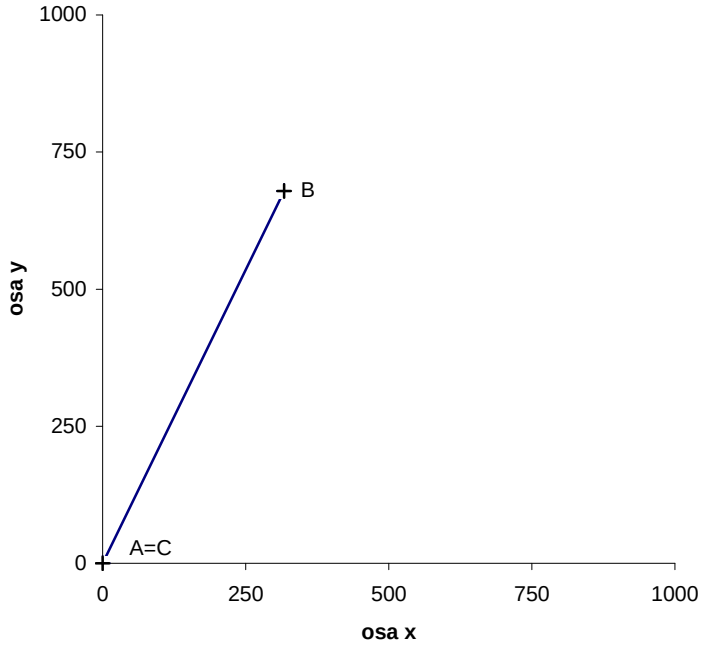
Tohoto případu bychom dosáhli tehdy, pokud by obě ramena byla stejně dlouhá a byla rovnoběžná. Tentokrát s podmínkou:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_1 = \theta_2 = \psi \\ \gamma &= 0 \end{aligned} \tag{18}$$

Obě ramena by se překrývala a vůbec by nezáleželo na velikosti úhlu θ. Při jakékoliv velikosti úhlu θ by nastal případ:

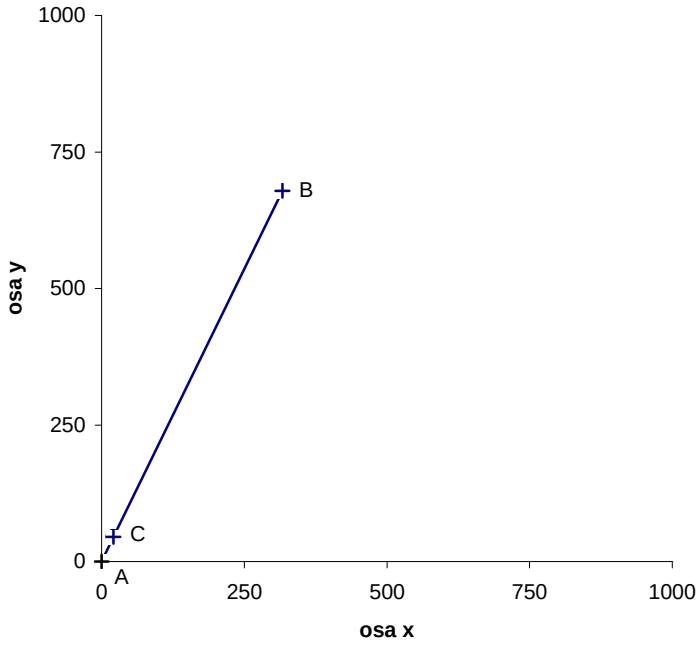
$$A[0,0] = B[0,0] \tag{19}$$

Jak ostatně ukazuje Obr. 18.



Obr. 18 Nekonečně mnoho řešení

Tato možnost řešení v našem případě nenastane, jelikož je ošetřen konstrukcí ramene, a to tak, že *rameno b* je o 50 mm delší než *rameno a* (Obr. 19 Jedno řešení).

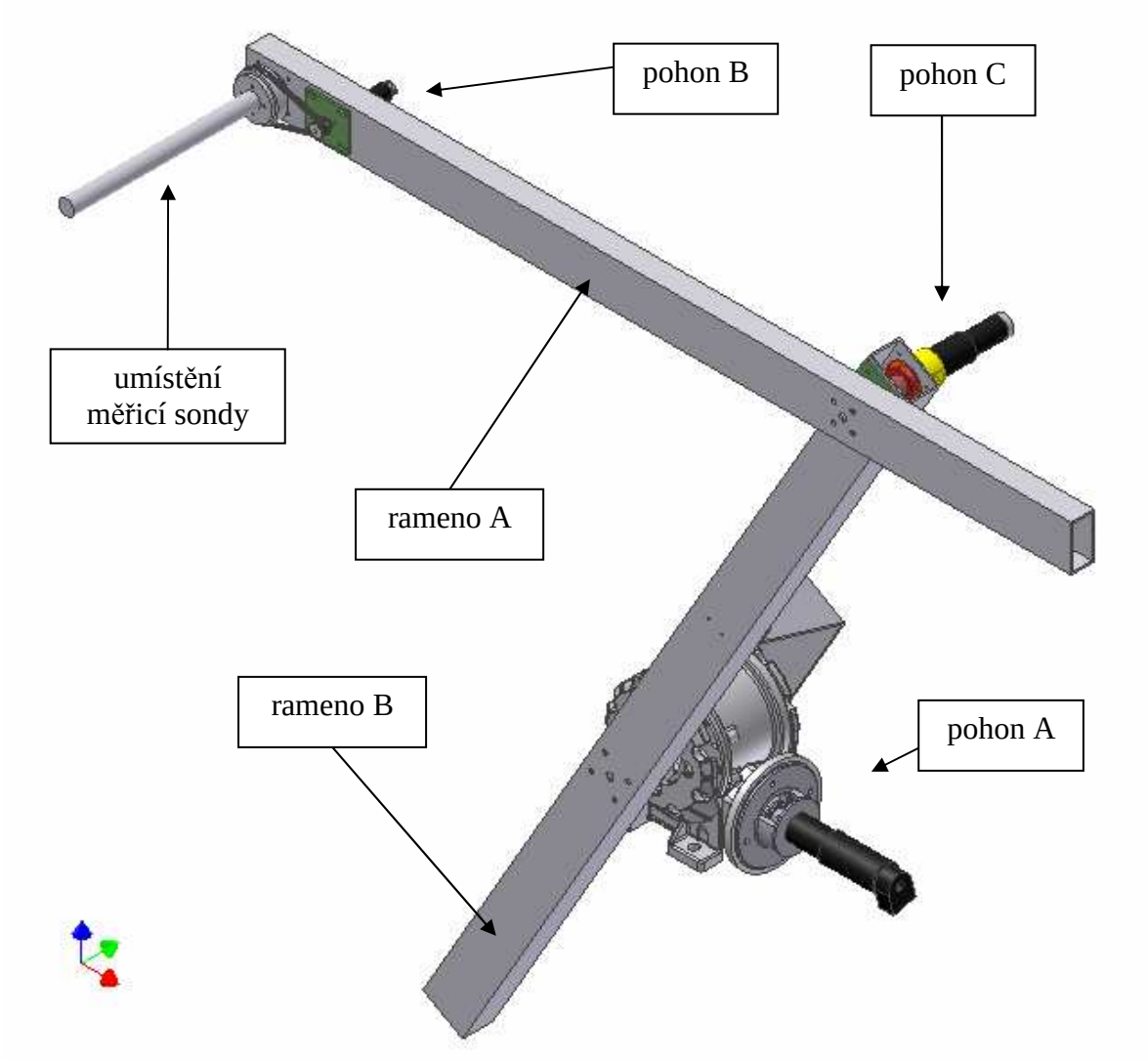


Obr. 19 Jedno řešení s dosažením vnitřní okrajové podmínky

3.3 Návrh mechanické konstrukce manipulátoru

Pro návrh manipulátoru byl použit přístup hardware in the loop. Na základě zadané kinematiky byl proveden prvotní návrh mechanické konstrukce. Následně byly provedeny dynamické simulace a jejich výsledky byly použity jako vstupy do pevnostní analýzy konstrukce a pro volbu pohonů. Výsledky pevnostních analýz byly zohledněny v návrhu mechanické konstrukce. Tento cyklus byl několikráte zopakován, až jsem se dostal k návrhu, který odpovídá zadaným požadavkům.

Dále v této kapitole budou publikovány pouze finální výsledky.



Obr. 20 Popis modelu manipulátoru

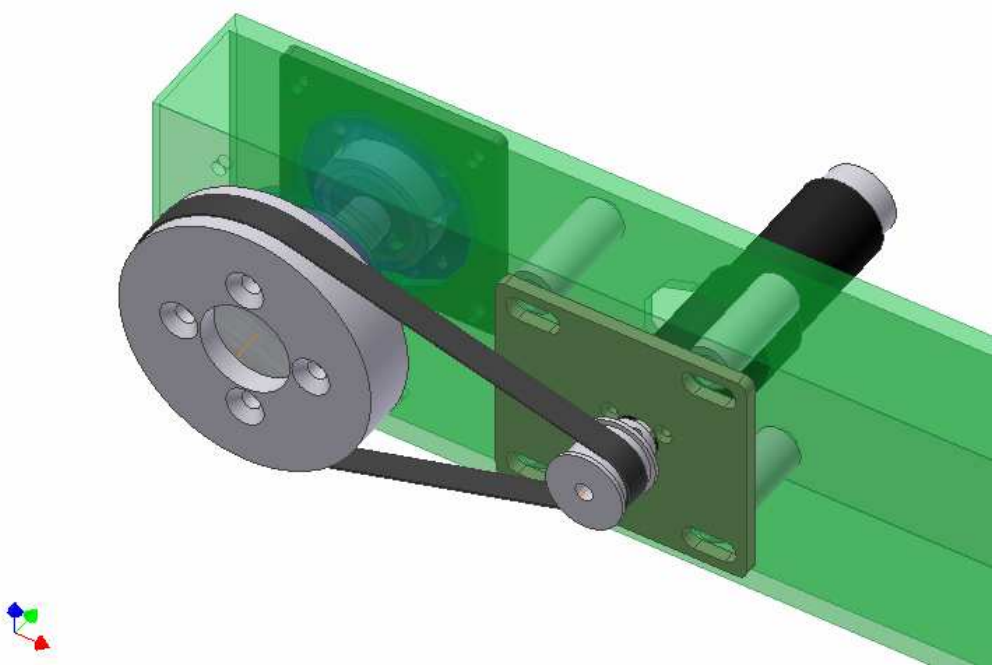
3.3.1 Základní části manipulátoru:

Model manipulátoru je zobrazen na Obr. 20. Jeho základní části jsou dvě ramena (*rameno A*, *rameno B*) a pohony (*pohon A*, *pohon B*, *pohon C*), jejichž natočení a poloha určují pracovní prostor manipulátoru.

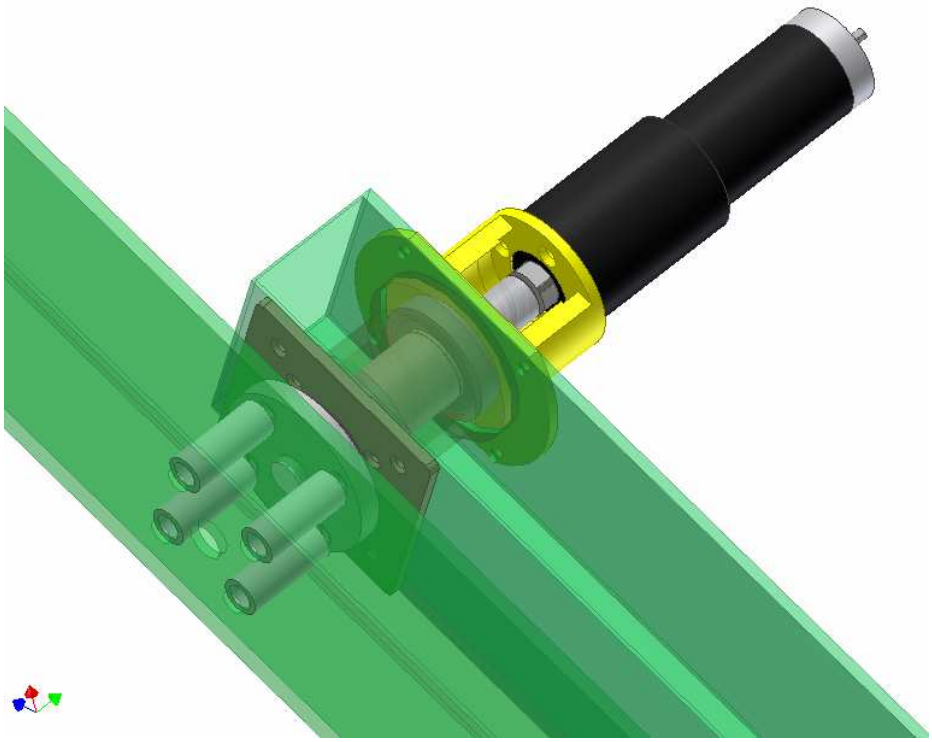
Kritické součásti manipulátoru byly od počátku návrhu obě ramena, u kterých bylo třeba vyšetřit možné deformace a všechny tři hřídele pohonů, u kterých bylo potřeba navíc provést dynamickou analýzu.

3.3.2 Uchycení pohonů

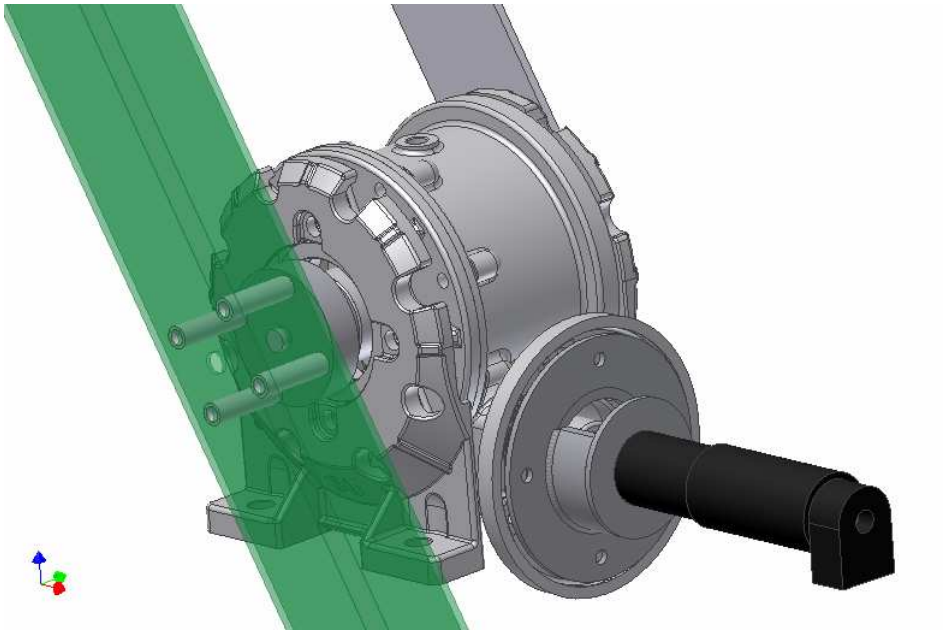
Uchycení pohonů je dle doporučení výrobce. Na hřídele pohonů jsou nalisována ložiska. Ložiska jsou následně vložena do pouzder. V modelu jsou veškerá ložiska, motory, převodovky, řemenice a řemen jako zjednodušené modely. Pro dynamickou a pevnostní analýzu není jejich přesný model potřeba. Veškerá uchycení a uložení jsou dle všeobecného doporučení [7], [8]. Všechny navrhnuté spoje jsou šroubové. Toto je dáno z důvodu jednoduché montáže. Pro zjednodušení neobsahuje model spojovací materiál Detailní zobrazení jednotlivých uložení je na Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23.



Obr. 21 Uložení *pohonu B*



Obr. 22 Uložení *pohonu C*



Obr. 23 Uložení *pohonu A*

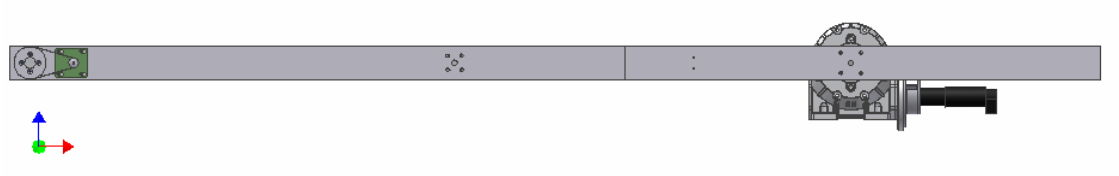
3.3.3 Dynamika manipulátoru

Pro dynamickou analýzu manipulátoru byl využit modul "Dynamická analýza" programu *Autodesk Inventor Professional* [2], [6], ve kterém jsem vytvářel model manipulátoru.

Důležitými parametry pro návrh konstrukce manipulátoru jsou potřebné momenty pohonů pro otočení ramen. Každý z momentů jsem vyšetřoval zvlášť, postupně od *pohonu B*, přes *pohon C* a až nakonec *pohon A*.

Odměření probíhalo následovně. Zvolil jsem si vždy jen jeden pohon, pro ten jsem nasimuloval nejnepříznivější podmínky, následně mu přidělil odhadnutou hodnotu momentu, přičemž ostatní pohony byly zafixovány. V průběhu simulace jsem nechal nastavený moment projevit, zda uvede do chodu zvolený pohon. Simulaci jsem opakoval tak dlouho, než jsem našel nejvhodnější hodnotu momentu.

Nejvíce namáhaný je manipulátor v poloze, kdy jsou ramena manipulátoru vůči sobě vodorovná a kolmá na tíhové zrychlení. Tato poloha byla dále prověřována i v pevnostní analýze (Obr. 24).



Obr. 24 Konfigurace pohonů pro vyšetřování maximálních momentů

Z dynamické analýzy tedy vyplývá, že potřebné momenty jednotlivých pohonů musí být větší, než které nám vyšly ze simulace. Porovnání výsledků simulace a doporučené hodnoty můžeme vidět v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2 Výsledné maximální momenty pohonů

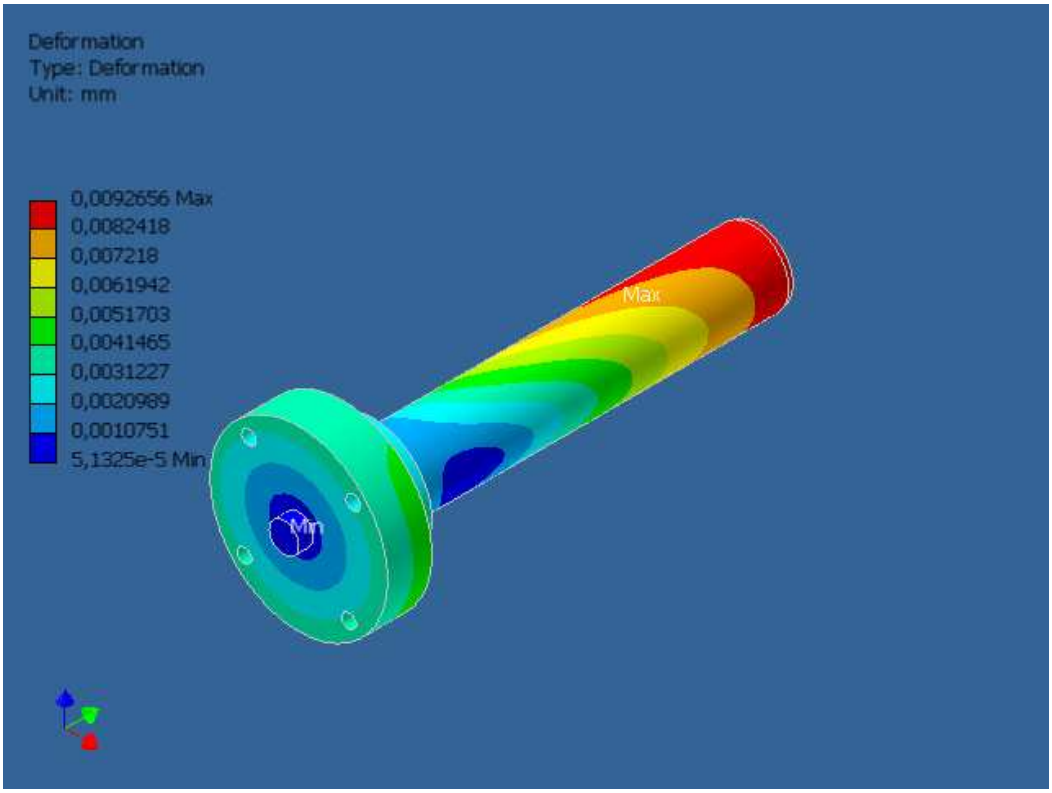
Pohon	Zatížení [N.mm]
B	250
C	8650
A	28900

3.3.4 Pevnostní charakteristika vybraných součástí manipulátoru

Z hlediska pevnostního nás nejvíce zajímají tuhosti a pevnosti ramen a jednotlivých hřídelí. Jejich zatížení lze nasimulovat v našem modelu. Opět byl vybrán případ největšího zatížení, kdy ramena manipulátoru jsou ve vodorovné poloze kolmé na tíhové zrychlení (Obr. 24). Z důvodu omezení simulačního programu lze vyšetřovat vždy jen jednu součást v daném okamžiku, proto jsou jednotlivé zatěžující stavy prováděny jednotlivě.

Hřídel pohonu A

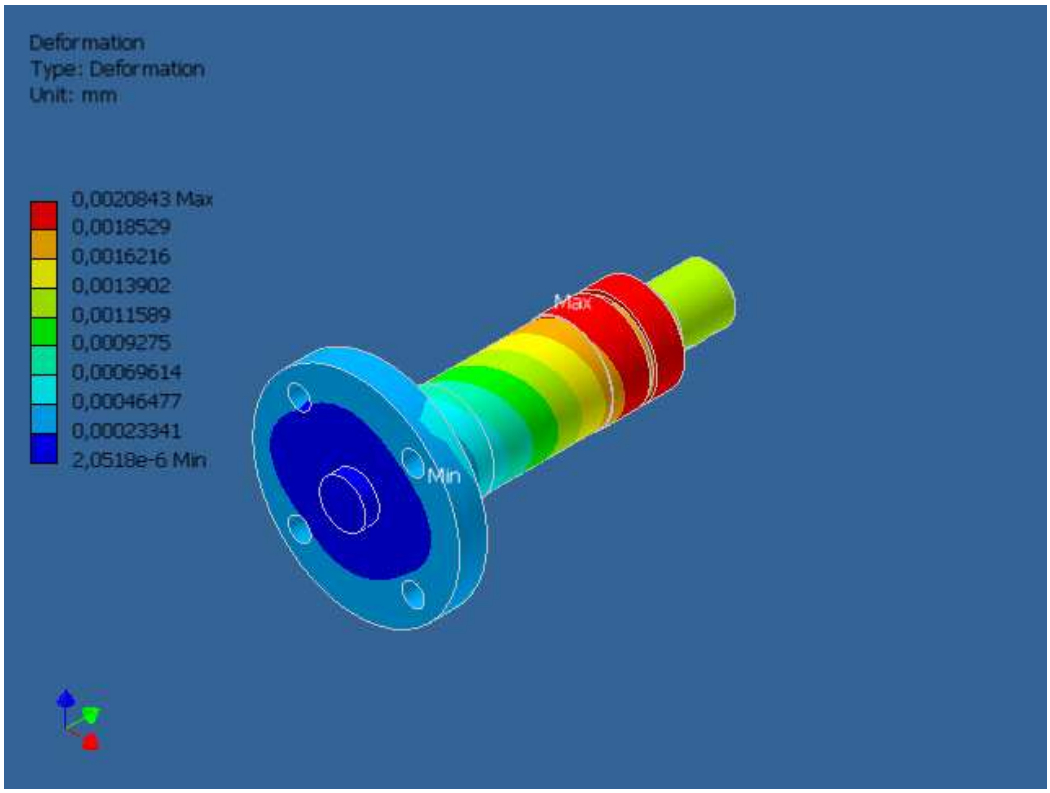
Z pevnostní analýzy vyplývá, že hřídel *pohonu A* je ze všech tří pohonů nejvíce namáhaná. Průběh deformace je vidět na obrázku (Obr. 25). Deformace je zanedbatelná a hřídel bude provozována s velkou bezpečností.



Obr. 25 Deformace hřídele *pohonu A*.

Hřídel pohonu C

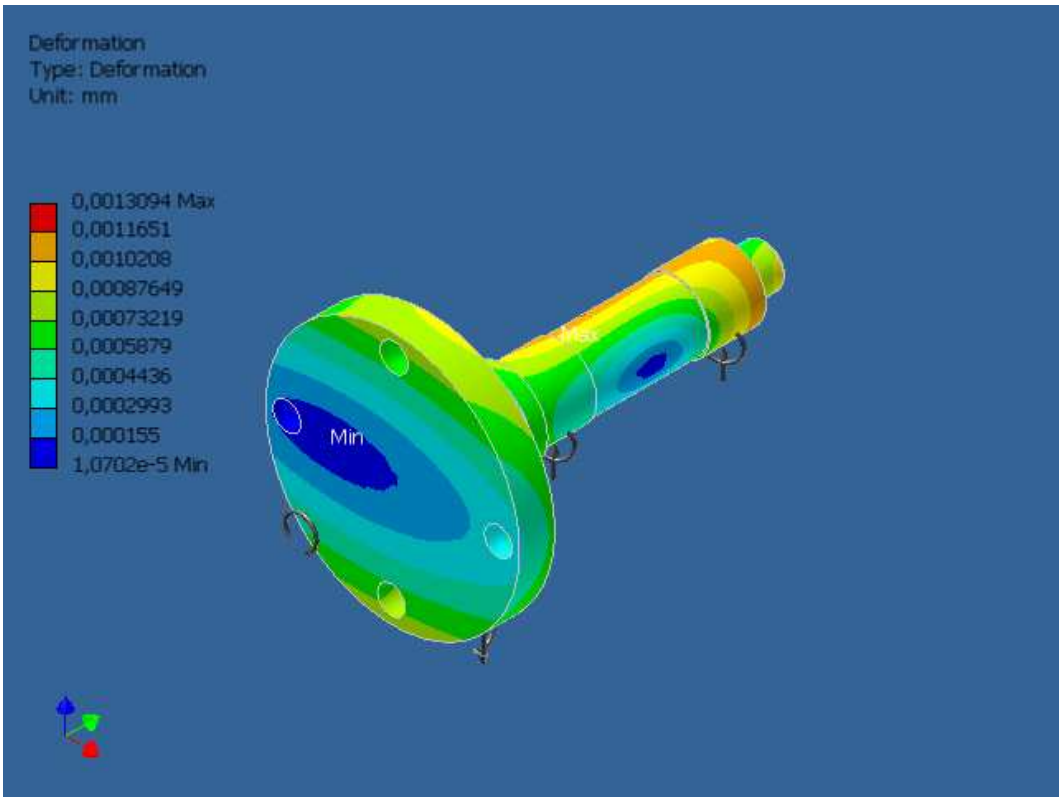
Další vyšetřovanou hřídelí je *hřídel B*, která otáčí s *ramenem A*. Výsledek pevnostní analýzy je zobrazen na Obr. 26, kde je vidět, že deformace je také zanedbatelná a hřídel bude provozována s velkou bezpečností.



Obr. 26 Deformace hřídele *pohonu C*

Hřídel pohonu B

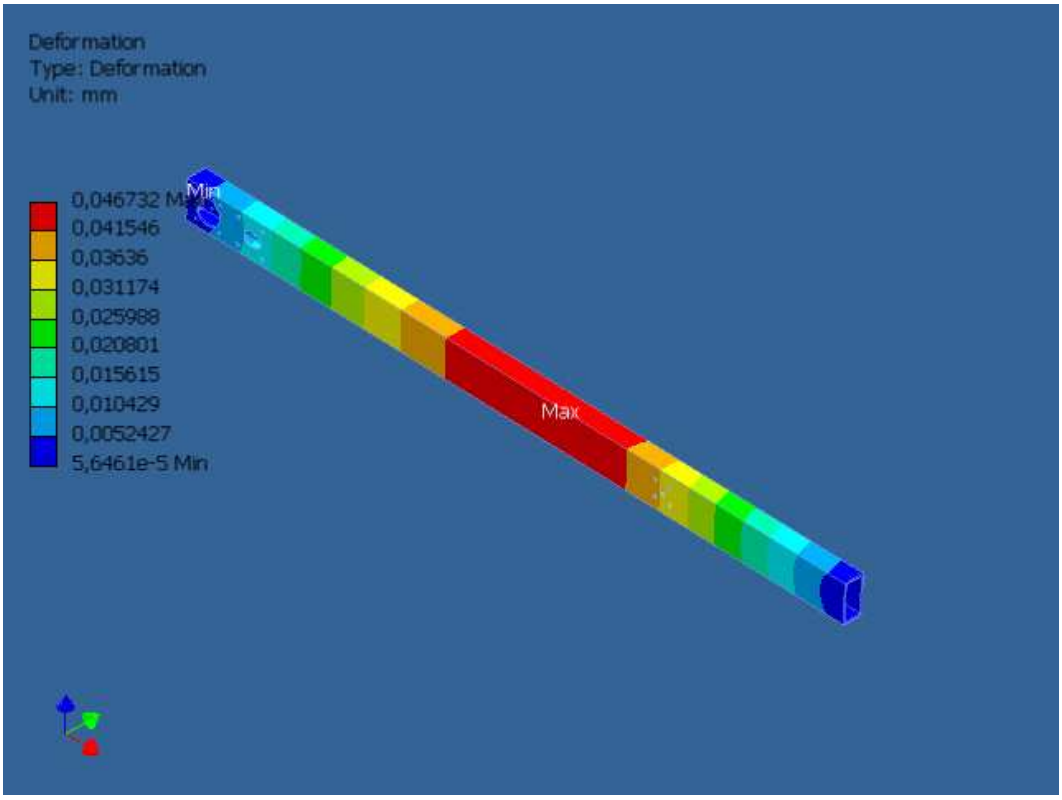
Nejméně namáhanou hřídelí z vyšetřovaných se ukázala být hřídel *pohonu C*. Výsledek pevnostní analýzy je zobrazen na Obr. 27, kde je také vidět, že deformace je zanedbatelná a hřídel bude provozována s vysokou bezpečností.



Obr. 27 Deformace hřídele *pohonu B*

Rameno A

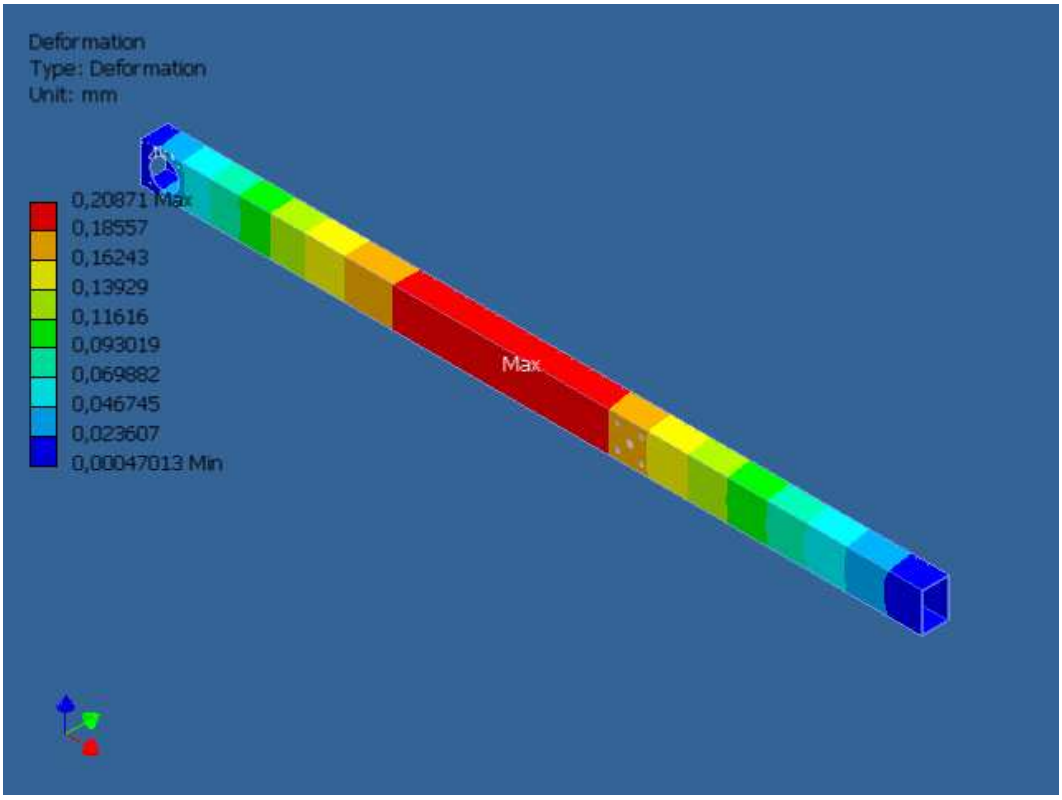
Další vyšetřovanou částí manipulátoru bylo *rameno A*, které drží *pohon C* a je přišroubované k hřídeli *pohonu B*. Na Obr. 28 je vidět deformace tohoto ramene, která v místě největšího namáhání není větší než, 0,05 mm. Rameno bude provozováno s velkou bezpečností.



Obr. 28 Zobrazení deformace *ramene A*.

Rameno B

Poslední vyšetřovanou částí bylo *rameno B*. Zde se projevilo větší zatížení větší deformací. Znázorněno na Obr. 29. Rameno bude provozováno s velkou bezpečností. Nejvyšší hodnota deformace je 0,2 mm. Tato elastická deformace má vliv i na celkovou přesnost manipulátoru.



Obr. 29 Grafické zobrazení deformace *ramene B*

Provedl jsem více testů s tímto ramenem např. zesílení stěny, volbu jiného materiálu, ale tento profil se ukázal být nejvhodnějším s ohledem na hmotnost a cenu celého manipulátoru.

3.3.5 Výběr pohonů

Předběžná volba pohonu byla provedena už v samém počátku návrhu, kdy byly brány v úvahu motory a převodovky firmy *maxon motor a.g.* [1], [13]. Dynamická a pevnostní analýza počítala s jejich hmotností a umístěním. To vedlo ke zpřesnění výsledků simulace. Konkrétní výběr pohonů byl proveden na základě dynamické a pevnostní analýzy. Pohony motorů byly vybírány následovně:

- Nejprve byl navrhnut motor *pohonu B* (pohon efektoru), simulačně ověřen a po vyhovujících výsledcích vybrán.
- Dalším krokem bylo přidání *pohon C* do modelu. Následovalo zjištění potřebného momentu a vybrání pro něj vhodného motoru.
- Nakonec byl stejným způsobem vybrán motor i pro *pohon A*.

Po provedení pevnostní analýzy byly tyto kroky zopakovány tolikrát, než se vybraly vhodné motory.

Pohon B

Nejvýhodnější pro *pohon B* byl zvolen řemenový převod, poháněný motorem A-max 19 s převodovkou GP 22C.

Potřebné výpočty pro výběr řemenic a řemene byly provedeny programem Contitech Suite 1.0. Na Obr. 30 je znázorněn detail konstrukce a umístění motoru. Motor je uložen uvnitř ramene a připevněn na krytku. Tato krytka je navržena s oválnými drážkami, aby bylo možné napínat řemen. Toto uložení se jevilo po celou dobu návrhu jako nejlepší. Výhody tohoto řešení mohou být: malé nároky na čistotu prostředí, není třeba mazat, dostatečně přesné spojení a zároveň vhodné k připojení k efektoru.



Obr. 30 Řemenový pohon (*pohon A*)

Pohon C

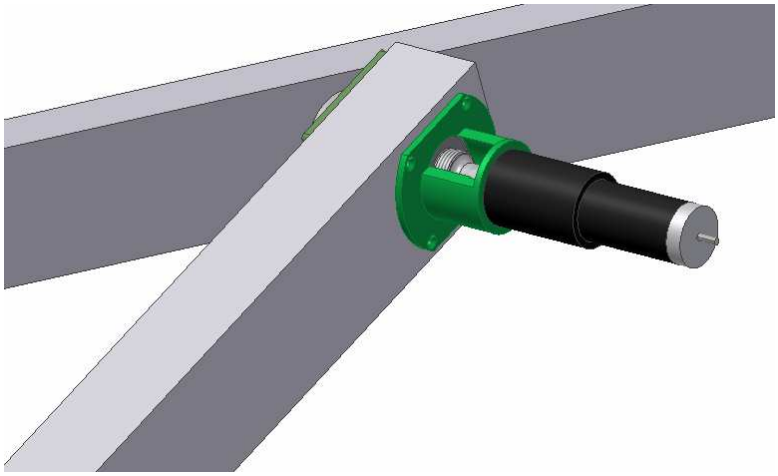
Pro tento pohon nebylo od počátku návrhu zcela jasné řešení. V úvahu připadal řemenový pohon (jako u *pohonu B*), šneková převodovka, vlastní šnekový převod.

- Řemenový pohon nebylo možno použít z důvodu nepříznivých výsledků pevnostní analýzy a komplikovanější konstrukce.

- Šnekovou převodovku nebylo možno použít pro její velikost, hmotnost a vysoké nároky na přesnost konstrukce (konkrétně dodržení souososti vstupní hřídele převodovky s motorem a výstupní hřídele převodovky s *hřídelí C*). Problém dodržení souososti bylo možno vyřešit hřídelovými spojkami, ale v jiných aplikacích na našem ústavě s nimi nebyly moc dobré výsledky.

- Vlastní šnekový převod byl pro svoji náročnou konstrukci také zamítnut.

- Nejvhodnější variantou se ukázala konstrukce, kdy spojení *hřídele C* a motorové hřídele je v jedné ose. Uchycení ramene je pomocí pouzdra (Obr. 31).



Obr. 31 Konstrukce pohonu B

Pro tento pohon byl vybrán motor A-max 26 s planetovou převodovkou GP 32C. Problémy spojené s dodržením souososti byl konstrukčně minimalizován díky vhodnému návrhu středících prvků.

Pohon A

Při výběru tohoto pohonu se požadovala samosvornost, z čeho vyplývalo použití šnekové převodovky. Nejvhodnější šnekovou převodovku jsem vybíral z nabídky firmy TOS Znojmo a.s. Podle algoritmu a výpočtů, které má firma prezentován na svých webových stránkách [12] jsem určil nejvhodnější typ převodovky: MRT 60A (Obr. 32).



Obr. 32 Převodovka MRT 60 A

Pro pohon šnekové převodovky byl navržen RE 36 s planetovou převodovkou GP 32C.



Obr. 33 Použité motory s převodovkami

Konečný přehled všech použitých motorů a převodovek je v tabulce (Tab. 3 Přehled všech použitých motorů a převodovek).

Tab. 3 Přehled všech použitých motorů a převodovek

pohon	motor	převodovka	druhá převodovka
A	RE 36	GP 32 C	MRT 60A
B	A-max 19	GP 22 C	-
C	A-max 26	GP 32 C	-

3.3.6 Mechanické parametry manipulátoru a zhodnocení konstrukce

Výhody použití motoru *maxon motor*:

- Nízká hmotnost
- Malé rozměry
- Vhodné pro řízení
- Dobrá spolupráce s dodavatelskou firmou

Podle požadavků zadavatele jsem navrhl hliníkovou konstrukci manipulátoru. Kromě dvou hřídelí, na které jsou kladeny větší požadavky na pevnost, ty jsou z oceli.

Přesnost manipulátoru je závislá na vůlích převodovek a tuhosti ramen. Přesné měření probíhá v místech, kde se tyto vůle neprojevují (vyplývá z charakteru měření). Tyto vůle by bylo možné snížit výběrem jiných převodovek s nižší vůlí, ale znamenalo by to několikanásobné navýšení nákladů, což zadavatel zamítl a spokojil se s přesností dosažitelnou se standardními převodovkami a použitím kompenzačních metod.

Celková konstrukce je navržena tak, aby byla co možná nejjednodušší jak na výrobu, tak pro montáž. Jednotlivé součásti byly navrženy tak, aby bylo možné je vyrobit v dílenských prostorách FSI VUT Brno. Jsou jim přizpůsobeny uvedené rozměrové tolerance.

Celkové parametry jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 4) :

Tab. 4 Parametry manipulátoru

hmotnost	cca 8 kg
pracovní prostor	ϕ2900 mm
přesnost	0,1 - 1 mm
nosnost	0,5 kg

4 NÁVRH ŘÍZENÍ MANIPULÁTORU

Protože zadavatel má dosavadní měření realizované pomocí LabVIEW [10], požaduje realizovat řídicí program jako virtuální přístroj v LabVIEW tak, aby ho mohl jednoduše začlenit do svých projektů. Řídicí program musí umožňovat zadávat požadovanou polohu a poskytovat informace o aktuální poloze koncového bodu ramene manipulátoru. Dále musí být schopné ošetřit běžné provozní stavy manipulátoru.

LavVIEW je moderní grafické vývojové prostředí od firmy National Instruments. LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je obecným vývojovým prostředím pro vytváření aplikací zaměřených do všech oblastí jeho částí – sběru, analýzy i prezentace naměřených dat. Nabízí uživateli plnohodnotný programovací jazyk se všemi odpovídajícími datovými a programovými strukturami, avšak v grafické podobě – tzv. G jazyk (Graphical language). Výsledný produkt tohoto vývojového prostředí se nazývá virtuálním přístrojem (Virtual Instrument), protože svými projevy a činností připomíná klasický přístroj v jeho fyzické podobě. [14].

4.1 Snímání polohy manipulátoru

Vzhledem k zadané přesnosti polohování manipulátoru bylo zvoleno pro snímání polohy manipulátoru pouze snímače na hřídeli motoru.

4.1.1 Faktory ovlivňující přesnost

Celkovou přesnost manipulátoru nejvíce ovlivňuje tuhost ramen a vůle v převodovkách. Důsledkem vůle v převodovkách je stav manipulátoru, při kterém se motor pohonu otáčí, ale výstupní hřídel pohonu zůstává v klidu, nebo naopak (velmi malé natočení). Dalším ovlivňujícím faktorem jsou vůle v uloženích.

4.1.2 Kompenzace nepřesností snímače

Z charakteru měření teplotního pole vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od měřeného teplotního zdroje (trysky) teplota i rychlost proudění ze začátku velmi rychle klesá a několik centimetrů od trysky (Obr. 13) se začne rychlost poklesu blížit nule. Manipulátor byl konstruován tak, aby v místě blízko trysky bylo měření co nejpřesnější. S poklesem rychlosti změny teplotního pole může i pomalu klesat přesnost měření. Toho je dosaženo najetím do referenční polohy v blízkosti trysky a umístněním manipulátoru tak, aby v této oblasti byly vymezeny vůle v převodech. S rostoucí vzdáleností od místa měření se zvětšuje chyba polohování v důsledku působení vůlí. Chyba plynoucí z vůle v převodovkách je tak jednoduše kompenzována. Z toho vyplývá, že manipulátor je schopen uspokojit požadavky na přesnost.

4.2 Výběr vhodných nástrojů

Aby bylo možné použít stávající kinematický model, bylo potřeba zjistit, které z možných nástrojů prostředí LabVIEW lze použít. V úvahu přicházely tyto nástroje:

- *Formula note*
- *Matlab skript*

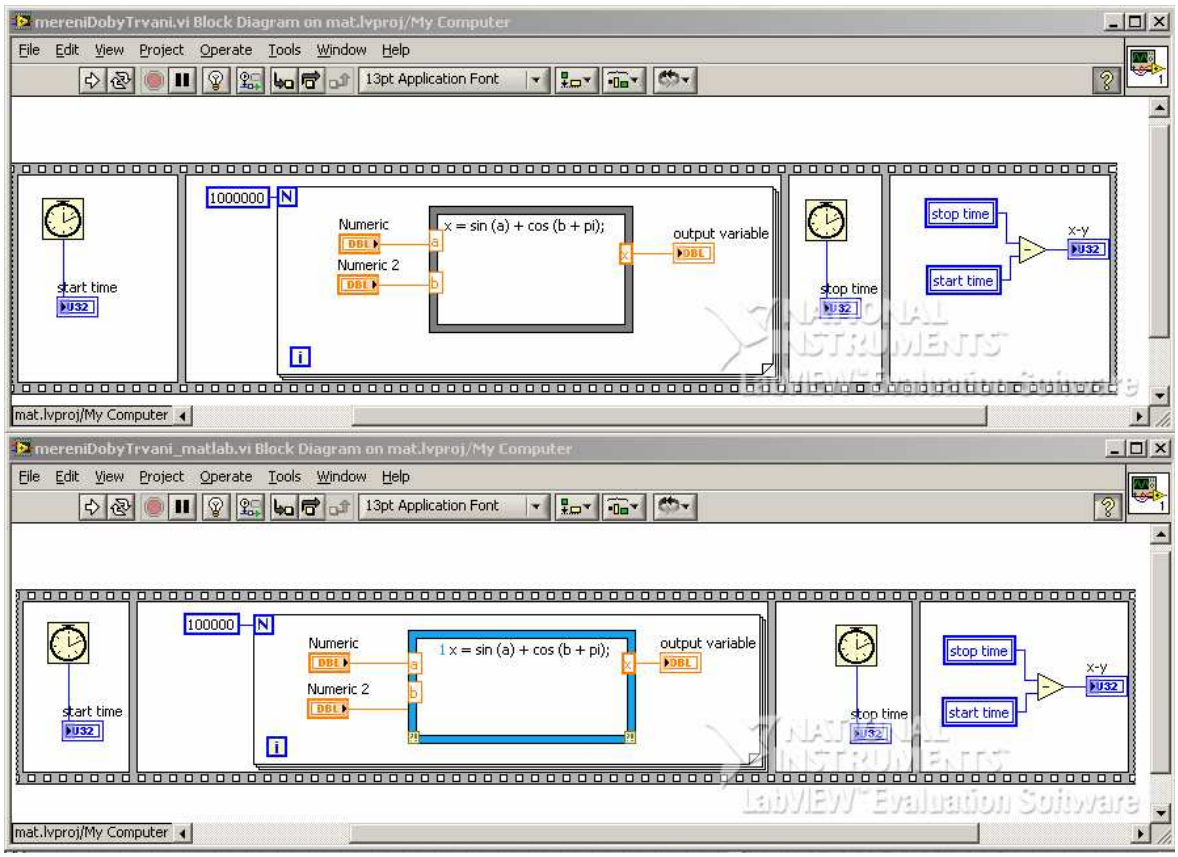
- *xMath skript*

xMath skript používá pro svoji funkci spouštění externí aplikace Matlab, proto se už od samého spuštění jevil jako nevhodný pro výpočty v reálném čase a byl proto vyřazen jako první. Navíc by bylo nutné instalovat aplikaci Matlab na každý počítač, na kterém by běžel řídicí program manipulátoru.

U dalších dvou nástrojů bylo zapotřebí vytvořit jednoduchý testovací kód, který by dokázal změřit délku výpočtu. Jeden z možných způsobů je na Obr. 34. Horní polovina ukazuje testování nástroje *Formula note* skriptu a dolní polovina Matlab skriptu.

Snahou bylo vytvořit stejné podmínky pro obě měření. Aby se měření navzájem neovlivňovala, bylo zapotřebí spouštět každou variantu samostatně. Měření jsem opakoval několikrát s různými parametry. Parametry, které jsem měnil, byly: doba výpočtu a počet výpočtů.

Jako jednoznačný vítěz testu vyšel *Formula note* kript, který byl několikanásobně rychlejší než Matlab skript. Nástroj *Formula note* využívá stejného zápisu kódu jako jazyk C [4].



Obr. 34 Testovací smyčka nástrojů

4.3 Návrh způsobu řízení

Realizace řídicího programu byla další etapou vývoje manipulátoru. Pro jeho vytvoření bylo potřeba mít navrhnutý kinematický model a model manipulátoru.

Pro program byl vytvořen algoritmus, který lze vidět na Obr. 35.

- V první fázi program provede načtení vstupních hodnot, jako jsou požadovaná poloha a aktuální poloha.

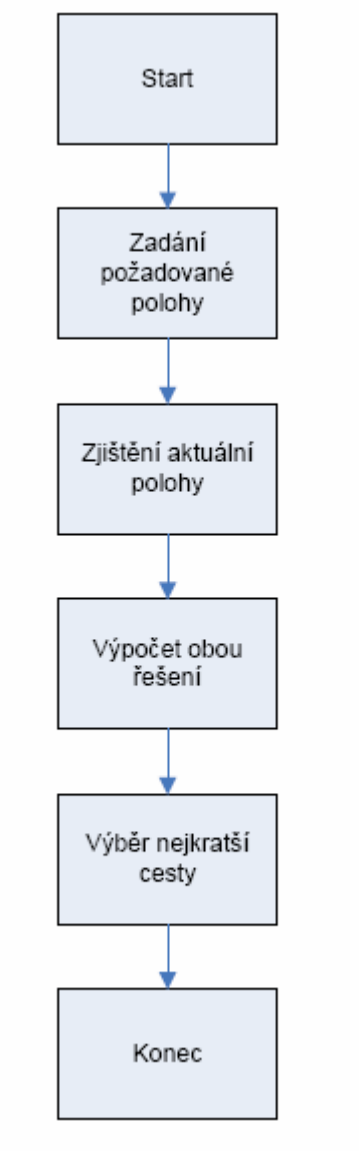
- Dále pokračuje výpočtem, zda je možné dostat se do požadovaného bodu. Pokud zadaný bod leží v pracovním prostoru manipulátoru, program pokračuje dál. Pokud ne, provede opravný výpočet a za požadovaný bod nastaví nejbližší možný.

- Po ověření dostupnosti požadovaného bodu provede program výpočet všech variant koncové polohy. Z kinematického modelu vyplývá, že jsou maximálně dvě možné varianty řešení (viz kapitola 3.2).

- Dalším krokem je výběr řešení. Pokud je možné se do požadované polohy dostat právě jedním způsobem, je výběr poměrně jednoduchý, ale tento případ nebude nastávat příliš často. Nejčastějším případem bude případ, kdy budeme moci požadovaný bod dosáhnout dvěma způsoby. Proto program vybírá vždy kratší cestu.

- Když je vypočítáno koncové nastavení polohy manipulátoru, zbývá výpočet rychlosti. Rychlost ramene, které koná pro přestavení delší dráhu je nastaveno na rychlost $\omega_1 = 1^\circ / s$. Z poměru délek obou drah je vypočítána rychlost druhého ramene. Rychlost ω_2 je počítána v poměru tak, aby bylo dosaženo efektu, kdy se pohybují obě ramena současně.

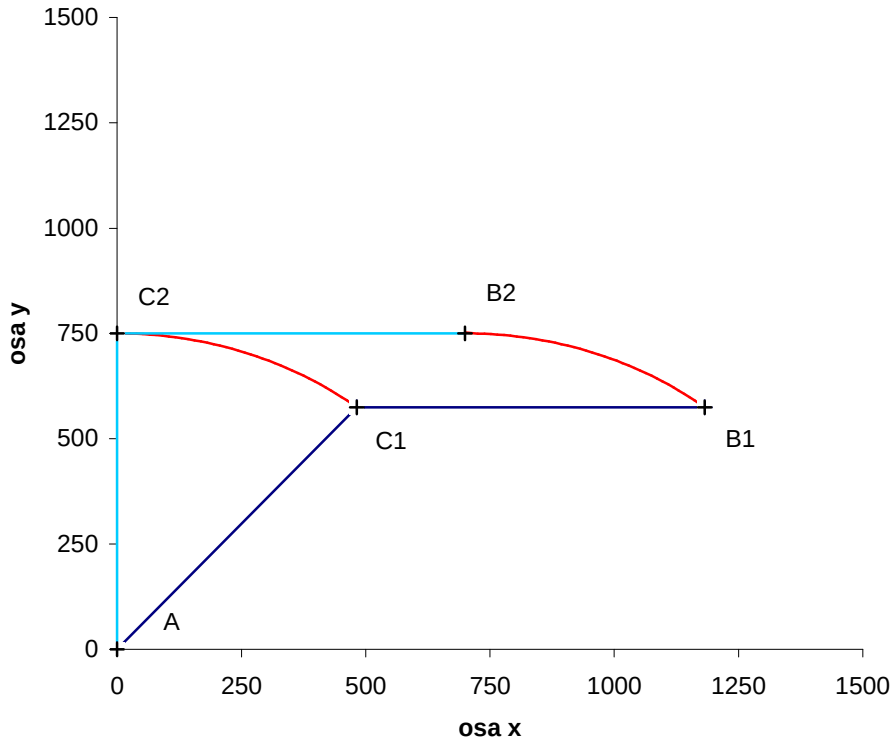
- Jakmile se manipulátor dostane do požadované polohy, zahlásí, že je v daném bodě a program je u konce.



Obr. 35 Algoritmus řízení

5 SIMULAČNÍ OVĚŘENÍ

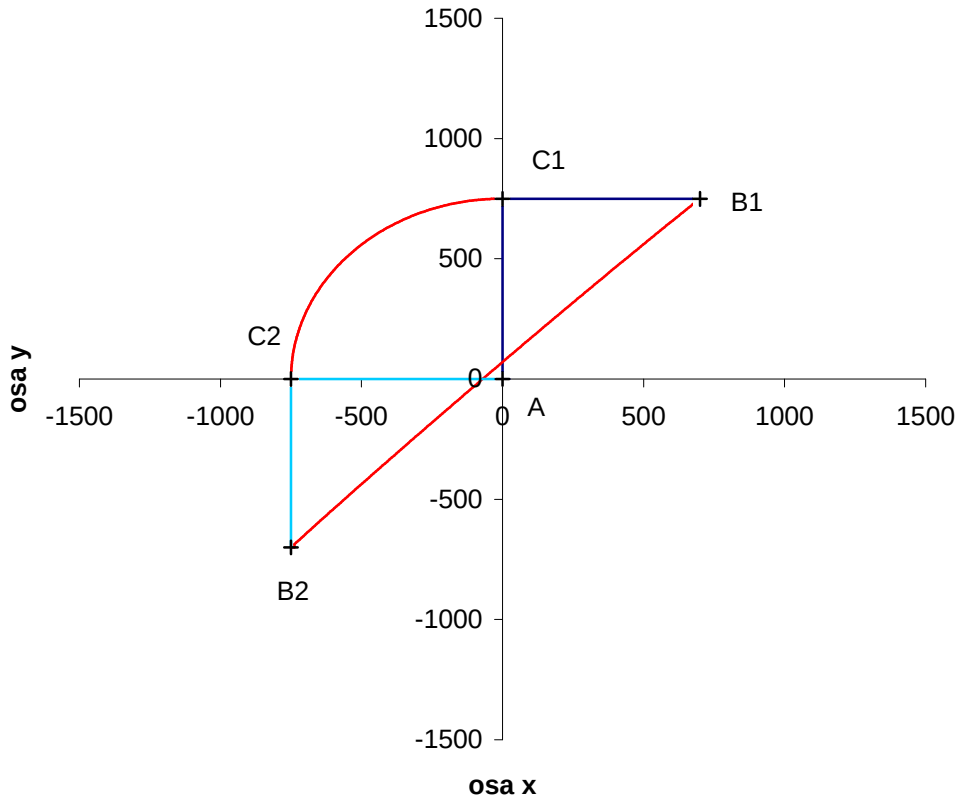
Na následujících obrázcích (Obr. 36, Obr. 37 a Obr. 38) jsou vidět trajektorie manipulátoru. Tmavě modrou je znázorněna výchozí pozice manipulátoru, světle modrou pak konečná pozice. Červené křivky ukazují dráhu bodů *B* a *C*. Doplněné informace o přesných pozicích bodů jsou uvedeny v tabulkách pod nimi (Tab. 5, Tab. 6 a Tab. 7).



Obr. 36 Trajektorie manipulátoru

Tab. 5 Trajektorie manipulátoru

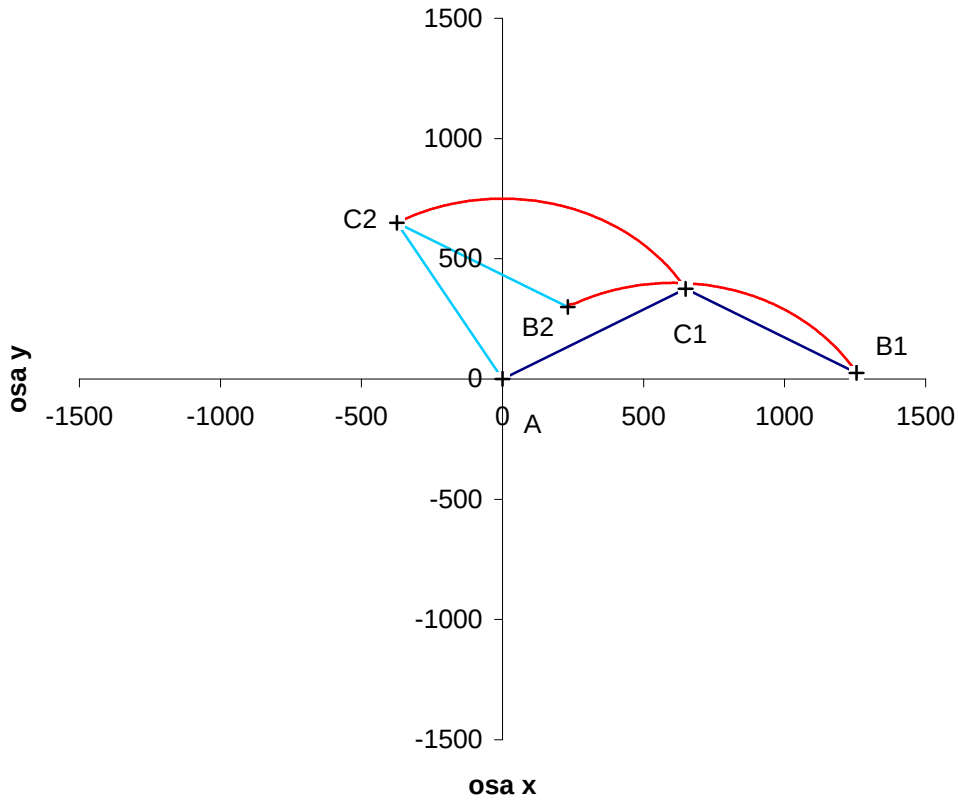
	x [mm]	y [mm]
A	0	0
B1	1182	574,5
C1	482	574,5
B2	700	750
C2	0	750



Obr. 37 Trajektorie manipulátoru

Tab. 6 Trajektorie manipulátoru

	x [mm]	y [mm]
A	0	0
B1	700	750
C1	0	750
B2	-750	-700
C2	-750	0



Obr. 38 Trajektorie manipulátoru

Tab. 7 Trajektorie manipulátoru

	x [mm]	y [mm]
A	0	0
B1	1255	25
C1	649	375
B2	231	299
C2	-374	649

6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce a řízení manipulátoru pro měření teplotního pole v laboratoři Odboru termomechaniky a techniky prostředí Energetického ústavu. V první části práce je zpracována rešeršní studie jednoduchých manipulátorů, na základě které byla zvolena koncepce konstrukčního návrhu, která byla odsouhlasena zadavatelem. Následně byla provedena analýza kinematiky manipulátoru a tato konstrukce byla namodelována, dynamicky a pevnostně ověřena v programu Autodesk Inventor Professional. Byly zvoleny odpovídající pohony. V neposlední řadě bylo ověřeno, zda je manipulátor smontovatelný. Pro návrhový proces konstrukce byl využit přístup hardware in the loop. Po dokončení návrhového procesu byla vytvořena výkresová dokumentace, která se nachází na přiloženém CD. Poté bylo přistoupeno k návrhu a simulaci řízení v prostředí NI LabVIEW. Poslední částí práce jsou výsledky simulací, které ověřují správnou činnost řízení.

Volba pohonů, snímačů i návrh celé konstrukce byly realizovány Obr. 39 s ohledem na finanční možnosti zadavatele. V současnosti je konstrukce zadána do výroby. Pohony a ostatní potřebné součásti jsou koupeny a připraveny na montáž. Současný stav řešení je zadavatelem potvrzen. Další fází výroby bude sestavení manipulátoru, oživení a ověření funkčnosti. Přípravky pro upínání měřících sond k manipulátoru na přírubu pohonu B, si bude zadavatel řešit individuálně pro jednotlivé typy používaných sond.

Software manipulátoru je navržen tak, aby bylo možné řídit manipulátor i při změně délky ramen. Musel by tomu však předcházet nový návrh parametrů manipulátoru a jeho pohonů. Bylo by tak možné vytvořit několik dalších ramen a podle potřeby měření je zaměňovat.

Pokračováním této práce bude oživení manipulátoru a ověření jeho funkčnosti. Dále bude muset být provedena integrace řídicího programu, který byl realizován v rámci této práce a měřícího software, který realizoval zadavatel.

7 POUŽITÁ LITERATURA

[1] Katalog výrobků firmy MAXON MOTOR, *Program 07/08*. Praha (EN): maxon motor 2007

[2] FOŘT P, KLETEČKA J. *Autodesk Inventor - Funkční navrhování v průmyslové praxi*. 2. aktualizované vydání. Computer Press, 2007. 318 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

[3] KARGER A, KARGEROVÁ M. *Základy robotiky a prostorové kinematiky*. 1. vyd. ČVUT, 2000. 265 s. ISBN 80-01-02183-1

[4] HEROUT P. *Učebnice jazyka C*. 4. přepracované vydání. Kopp, 2005. 280 s. ISBN 80-7232-220-6

[5] SKALICKÝ, J. Elektrické servopohony. 2. vyd. Brno, 2001. 86 s. ISBN 80-214-1978-4

[6] AUTODESK, *Inventor getteting start*. Součástí programu Autodesk Inventor Professional 2008) [pdf dokument] <AI_Simulation_2008_GetStart.pdf>

[7] LEINVEBER J, VÁVRA P. *Strojírenské tabulky*. 3. doplněné vyd. Úvaly, 2006. 914s. ISBN 80-7361-033-7.

[8] SVOBODA P, BRANDEJS J, KOVAŘÍK R, SOBEK E. *Základy konstruování: Výběr z norem pro konstrukční cvičení.* AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno: září 2001. ISBN 80-7204-214-9

[9] PAVELEK M, ŠTĚTINA J, *Experimentální metody v technice prostředí*. 1. vyd. VUTIUM, 1997. 200 s. ISBN 80-214-0970-3

[10] NATIONAL INSTRUMENTS, *Getting Started with LabVIEW August 2007* [pdf dokumen] Dostupné z <http://www.ni.com/pdf/manuals/373427c.pdf>

[11] MATHWORKS, *Matlab Getting started* [online]. 2007 <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/learn_matlab/bqr_2pl.html>

[12] TOS-ZNOJMO, *TOS Znojmo a.s. - Šnekové převodovky* [online] 10.12.2007 [cit. 2008-05-10] dostupné z <http://www.tos-znojmo.cz/produkce/mrt/cz/index.html>

[13] MAXON MOTOR *High Precision Drives and Systems maxon motor - supplier of high-precision drive systems. The product range is comprehensive: dc motors, brushless motors, planetary gears, spur gears, servo amplifiers, position controllers, wormgear. maxon motor*: [online] [cit. 2007-12-1] dostupné z <http://www.maxonmotor.com/product_overview.html>

[14] Štětina J, Jaroš M, Ramík P. *Virtuální laboratoř - Experimentální metody* [on-line]. Brno, 2003, cit 23.5.2008 [pdf dokument]. Dostupné na: < http://uai.fme.vutbr.cz/lab/FAQ/labview/Skripta_Stetina2003.pdf >

[15] MACEK J. *Řízení pohybu podvozku mobilního robotu OMR* III. Diplomová práce. Brno. FSI VUT Brno, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2006. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D

[16] MICROCHIP, *Motor control feedback circuit*, cit. 24.11.2003. [pdf dokument] dostupné na <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00894a.pdf>

[17] MAXON, *Motory a řízení pohonů*, rev. 25.9.2007 [pdf dokument]. Dostupné z <http://www.uzimex.cz/soubory/20070928_motory_rizeni_1.4.pdf>

[18] Andrš O. *Řídicí systém pro mobilní kolové roboty OMR III*. Diplomová práce. Brno. FSI VUT Brno, Ústav automatizace a informačních technologií, 2007. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

[19] MAXON MOTOR, *Resolvery - Snímače - maxon motor ag - UZIMEX: Špičkové technologie do automatizace a robotizace:* <http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Resolvery.html>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Paralelní manipulátor, hexapod [3] 19

Obr. 2 Schéma šestičlenného robota [3] 20

Obr. 3 Paralelní robot [3] 20

Obr. 4 Mechanická ruka [3] 21

Obr. 5 Bennettův mechanismus [3] 23

Obr. 6 Řez stejnosměrným motorem [5] 24

Obr. 7 Hallův snímač polohy elektricky komutovaného motoru [5] 25

Obr. 8 Axiální pětifázový reluktanční krokový motor [5] 27

Obr. 9 Elektrické schéma revolveru [19] 28

Obr. 10 Princip činnosti optického inkrementálního snímače [15] 29

Obr. 11 Hallův jev [16] 30

Obr. 12 Dva různé typy Hallových snímačů [16] 30

Obr. 13 Pracovní prostor 33

Obr. 14 Pracovní prostor manipulátoru 34

Obr. 15 Zjednodušený model manipulátoru 35

Obr. 16 Jedno řešení 38

Obr. 17 Dvě možná řešení 39

Obr. 18 Nekonečně mnoho řešení 40

Obr. 19 Jedno řešení s dosažením vnitřní okrajové podmínky 41

Obr. 20 Popis modelu manipulátoru 42

Obr. 21 Uložení *pohonu B* 43

Obr. 22 Uložení *pohonu C* 44

Obr. 23 Uložení *pohonu A* 44

Obr. 24 Konfigurace pohonů pro vyšetřování maximálních momentů 45

Obr. 25 Deformace hřídele *pohonu A.* 46

Obr. 26 Deformace hřídele *pohonu C* 47

Obr. 27 Deformace hřídele *pohonu B* 48

Obr. 28 Zobrazení deformace *ramene A.* 49

Obr. 29 Grafické zobrazení deformace *ramene B* 50

Obr. 30 Řemenový pohon (*pohon A*) 51

Obr. 31 Konstrukce pohonu B 52

Obr. 32 Převodovka MRT 60 A 53

Obr. 33 Použité motory s převodovkami 54

Obr. 34 Testovací smyčka nástrojů 58

Obr. 35 Algoritmus řízení 60

Obr. 36 Trajektorie manipulátoru 61

Obr. 37 Trajektorie manipulátoru 62

Obr. 38 Trajektorie manipulátoru 63

9 SEZNAM PŘÍLOH

Tab. 8 Seznam příloh

	Soubor	Popis
1	M001.pdf	Nosník
2	M002.pdf	Nosník
3	M003.pdf	Hřídel
4	M004.pdf	Hřídel
5	M005.pdf	Hřídel
6	M006.pdf	Hřídel
7	M007.pdf	Pouzdro
8	M008.pdf	Pouzdro
9	M009a.pdf	Objímka
10	M009b.pdf	Příruba - svarek
11	M010.pdf	Objímka
12	M011.pdf	Krytka
13	M012.pdf	Krytka - napínací
14	M013.pdf	Krytka
15	M014.pdf	Řemenice
16	M015.pdf	Řemenice
17	M016-M018.pdf	Sloupek
18	M019.pdf	Pas
19	M020.pdf	Příruba – 1c
20	M021.pdf	Příruba – 2c
21	M022.pdf	Příruba – 3c
22	MS101.pdf	Sestava
23	kusovnik.pdf	Kusovník