



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VIRTUÁLNÍ PROTOTYP MECHATRONICKÉ SOUSTAVY

VIRTUAL PROTOTYPE OF MECHATRONIC SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Dinga

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Milan Dinga
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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

Virtuální prototyp mechatronické soustavy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Virtuální prototypování je velmi efektivní nástroj využívaný pro vývoj moderních mechatronických soustav. Jedná se zejména o manipulátory, kde lze modelovat jak mechanickou, elektro-mechanickou i elektrickou část a simulovat jejich chování dohromady. Cílem práce je vytvoření virtuálního prototypu mechatronické soustavy v prostředích ADAMS a SIMULINK.

Cíle bakalářské práce:

1. Analýza úlohy virtuálního prototypu zvoleného manipulátoru.
2. Vytvoření dynamického modelu manipulátoru.
3. Vytvoření modelu elektro-mechanického aktuátoru.
4. Co-simulační propojení obou modelů v prostředí ADAMS a SIMULINK
5. Návrh řídicí strategie virtuálního prototypu.

Seznam literatury:

Edward J Haug: Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, 1989.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá modelovaním virtuálneho prototypu delta 3D tlačiarne a co-simulačným prepojením tohoto modelu v prostredí ADAMS a MATLAB/SIMULINK. Prvá časť obsahuje vytvorenie virtuálneho modelu a analýzu jeho kinematiky. Ďalej je vytvorený model elektrických motorov a posledná časť sa skladá z co-simulácie a návrhu riadenia.

Kľúčové slová

MSC.ADAMS, MATLAB/SIMULINK, co-simulácia, multi-body systém, virtuálny prototyp, 3D tlačiareň

Abstract

This thesis deals with modeling of delta 3D printer virtual prototype and its co-simulation using software ADAMS and MATLAB/SIMULINK. The first part consists of virtual model creation and its kinematic analysis. Then a model of electric motors is created. The final part consists of co-simulation and control design.

Key words

MSC.ADAMS, MATLAB/SIMULINK, co-simulation, multi-body system, virtual prototype, 3D printer

Bibliografická citácia

DINGA, M. *Virtuální prototyp mechatronické soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma „Virtuální prototyp mechatronické soustavy“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

26. mája 2016

.....

Milan Dinga

Pod'akovanie

Týmto ďakujem pánovi doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za cenné pripomienky a rady pri vypracovaní bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	10
2	Model tlačiarne.....	11
	2.1 MSC.ADAMS.....	11
	2.2 MATLAB/SIMULINK.....	12
	2.3 Vytvorenie modelu tlačiarne.....	12
3	Inverzná kinematika	15
	3.1 Analýza kinematiky	15
	3.2 Overenie správnosti inverznej kinematiky.....	19
4	Model elektro-mechanického aktuátora	21
	4.1 Analýza DC motoru	21
	4.2 Vytvorenie modelu DC motoru	23
	4.3 Overenie správnosti modelu DC motoru	24
5	Co-simulácia medzi ADAMS a MATLAB.....	27
	5.1 ADAMS/Controls plant export.....	27
	5.2 Návrh riadenia.....	28
	5.3 PID regulátor.....	29
	5.4 Simulácia chovania motoru s PID regulátorom	30
6	Záver	35
7	Zoznam použitej literatúry	36
8	Zoznam použitých obrázkov	37

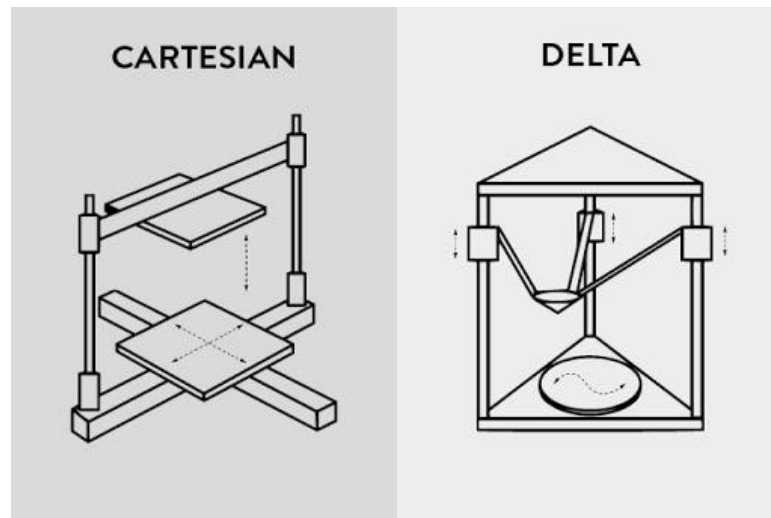
1 Úvod

Virtuálne prototypovanie je v dnešnej dobe veľmi ceneným nástrojom, pretože náklady na vytvorenie skutočného modelu môžu byť častokrát veľmi vysoké a pri nevhodnom návrhu je veľmi pravdepodobné, že prostriedky investované do realizácie budú nenávratne stratené. Modelovacích nástrojov je veľké množstvo a vhodnou kombináciou a co-simuláciou sa dá vytvoriť veľmi presný model, ktorý by verne simuloval reálne správanie skutočného stroja. V tejto práci využijeme software MSC.ADAMS na vytvorenie multi-body systému a matematický software MATLAB/SIMULINK, ktorými budeme co-simulovať a riadiť správanie daného prototypu. Tým bude 3D tlačiareň delta typu.

3D tlačiareň je moderné zariadenie s veľkou perspektívou, pretože požadovaný objekt vo virtuálnej podobe je možné "vytlačiť" bez obsluhy a kontroly a veľkosť je obmedzený iba konštrukciou tejto tlačiarne. Nie je problém takýmto spôsobom vytvoriť budovu, automobil, alebo pri veľmi precíznom stroji dokonca aj mikro objekty šírky ľudského vlasu.

2 Model tlačiarne

Čo sa týka spôsobu pohybu ramien, existujú dva základné typy 3D tlačiarňí (obrázok 2.1). Jedným typom je tlačiareň založená na karteziánskom štýle a druhým je delta tlačiareň. Karteziánska tlačiareň pohybuje svojim nosníkom priamo do určených pozícií na osách x , y a z , zatiaľ čo u delta tlačiarne je nutné prepočítať polohu každého z manipulátorov na koncovú pozíciu efektoru. Výhodou ale je, že tieto manipulátory sa pohybujú iba v jednej ose.



Obr. 2.1: Typy 3D tlačiarňí [1]

V našej práci sa budeme zaoberať vytvorením virtuálneho prototypu delta tlačiarne.

Delta tlačiareň má medzi manipulátorom a efektorom 2 spojovacie telesá (viď. obrázok 2.2), vďaka ktorým má len 3 stupne voľnosti a tými sú pohyb v ose x , y a z . Ak by mala táto tlačiareň len 1 spojovacie teleso medzi manipulátorom a efektorom, nebolo by zamedzené rotácií efektoru a tým pádom by mal 6 stupňov voľnosti. Znamená to teda, že každá dvojica týchto spojovacích telies odoberá 1 stupeň voľnosti.

Model tejto tlačiarne bude vytvorený v prostredí MSC.ADAMS a MATLAB/SIMULINK.

2.1 MSC.ADAMS

Software MSC.ADAMS [2] od spoločnosti MSC.SOFTWARE, založenej v roku 1963, je najpoužívanejší software na multibody dynamiku vo svete. Skratka ADAMS znamená

Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems. Je založený na riešičoch Fortran a C++. Obsahuje veľa prídavných modulov, ktoré sú na mieru prispôsobené danému odvetviu, napríklad ADAMS/Car, ADAMS/Aircraft, ADAMS/Durability a mnoho ďalších. Na rozdiel od väčšiny CAD embedded nástrojov, tento software zahŕňa reálne fyzikálne správanie riešením rovníc pre kinematiku, statiku a dynamiku.

2.2 MATLAB/SIMULINK

MATLAB [3] je programovacie prostredie s vlastným programovacím jazykom od spoločnosti MathWorks vytvorený v roku 1984. Je optimalizovaný na riešenie inžinierskych a vedeckých problémov. Využíva sa napríklad v medziplanetárnych vesmírnych lodiach, zdravie-moniturujujúcich prístrojoch alebo inteligentných elektrických sieťach. Používa sa na spracovanie signálov a obrázkov, na komunikáciu, ekonomiku, robotiku a mnoho ďalších. Jeho jazyk založený na maticiach (MATLAB - MATrix LABoratory) je ten najlepší spôsob ako vyjadriť výpočtovú matematiku a vďaka zabudovanému grafickému rozhraniu je ľahké interpretovať dosiahnuté výsledky.

SIMULINK je nadstavbou MATLABu pre simuláciu a modelovanie dynamických systémov. Dovoľuje riešiť problémy vedy vďaka rozhraniu založenom na blokových diagramoch. Podporuje simuláciu, automatické generovanie kódu a testy v reálnom čase.

Veľkou výhodou MATLAB/SIMULINK je aj ich možnosť co-simulácie s inými programami, napríklad s ADAMS.

2.3 Vytvorenie modelu tlačiarne

Model by bolo možné vytvoriť aj v CAD nástroji a následne importovať do ADAMS, ale nám postačí aj model vytvorený priamo v ADAMS, ktorý bude pre naše účely dostatočne prezentovať fyzikálnu skutočnosť.

Keďže jednotlivé manipulátory sú od seba vzdialené 120° , je vhodné v ADAMS nastaviť pracovnú mriežku na polárne súradnice, pretože inak by bolo počítanie súradníc náročnejšie a po zaokrúhlení aj menej presné.

Ďalej je naša základňa vytvorená pomocou: *Bodies* \rightarrow *RigidBody: Plate* s polomerom opísanej kružnice $R_c = 580$ mm. Zvodidlá pre manipulátory sú vysoké 1200 mm a boli vytvorené takto: *Bodies* \rightarrow *RigidBody: Cylinder*. Tie sú pevne spojené so základňou a pre každý manipulátor máme 2 zvodidlá, aby sme zaručili jeho pohyb len v

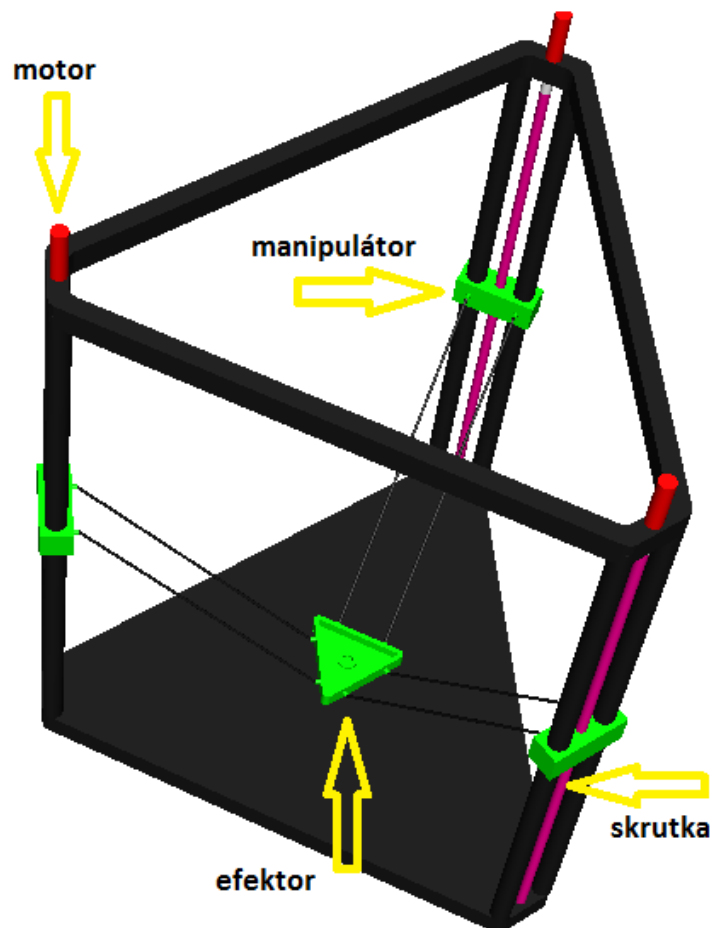
jednej ose. Napokon je základňa spojená ďalšími telesami na druhých koncoch zvodidiel pre lepšiu stabilitu. Týmto je základné teleso hotové a pristupujeme ďalej k vytvoreniu manipulátorov.

Tie sú vytvorené z kvádrov *Bodies* → *RigidBody: Box* a spojené so zvodidlami posuvnou väzbou *Connectors* → *Create a Translation joint*. Stredom týchto kvádrov vedieme skrutky (*Connectors* → *Create a Screw joint*), ktoré slúžia k pohybu týchto manipulátorov v ose z vďaka motorom, ktoré sú umiestnené na konci týchto skrutiek a ktoré sú prepojené za pomoci prevodovky (podrobnejšie v kapitole 4). Skrutky sú k základni pripojené rotačnou väzbou *Connectors* → *Create a Revolute joint*.

Efektor bol zostavený z viacerých jednoduchých telies a spojený s manipulátormi pomocou tyčiek dĺžky L a niekoľkých sférických väzieb *Connectors* → *Create a Spherical joint*.

Tvorba motorov je popísaná v kapitole 4.

Model nami vytvorenej tlačiarne je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Model tlačiarne

Vypočítať dynamiku tohoto modelu je veľmi náročné, pretože pri premenlivej polohe efektoru sú premenlivé aj dynamické veličiny. Túto prácu a výpočet momentov zotrvačnosti všetkých telies za nás vykoná simulačný software. Je však potrebné definovať mu aspoň hmotnosti jednotlivých telies, prípadne hustotu materiálu.

- efektor - 0.5 kg
- manipulátor - 0.6 kg
- skrutka - 0.7 kg
- spojovacie teleso - 0.15 kg

Všetky rozmery sú zakótované na obrázkoch 3.1 a 3.2. Nami vytvorený model má teda tieto rozmery (tab. 2.1).

tab. 2.1: rozmery tlačiarne

A_{co}	40,00 mm
A_{cz}	518,75 mm
A_e	70,00 mm
L	700,00 mm
H_{cz}	80,00 mm
A_d	470,00 mm
R_c	580,00 mm

3 Inverzná kinematika

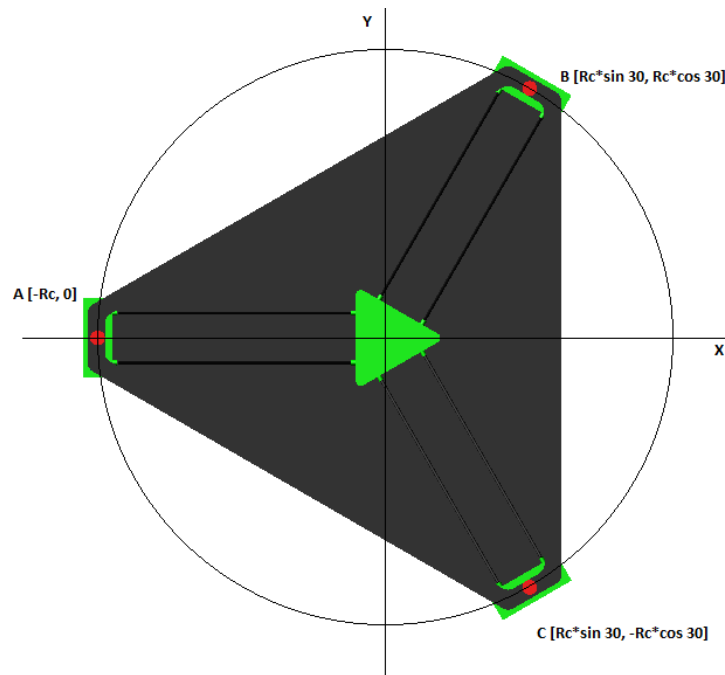
Kinematika je náuka o pohybe telies bez zohľadnenia síl a momentov, ktoré tento pohyb spôsobujú. Tvorí základ klasickej mechaniky. K uľahčeniu popisu pohybu telesa, je toto teleso nahradené hmotným bodom. Pod týmto pojmom rozumieme myslené teleso, ktorého tvar a rozmery môžeme k skúmaniu pohybu zanedbať.

Priama kinematika určuje polohu koncového člena (v našom prípade hovoríme o efektore) v závislosti na polohe a uhloch natočenia jednotlivých členov (manipulátorov).

Inverzná kinematika pristupuje k problému presne opačným spôsobom, kde z polohy efektora určuje polohu manipulátorov. Táto metóda sa po prvý krát objavila v robotike na riadenie priemyslových manipulátorov.

3.1 Analýza kinematiky

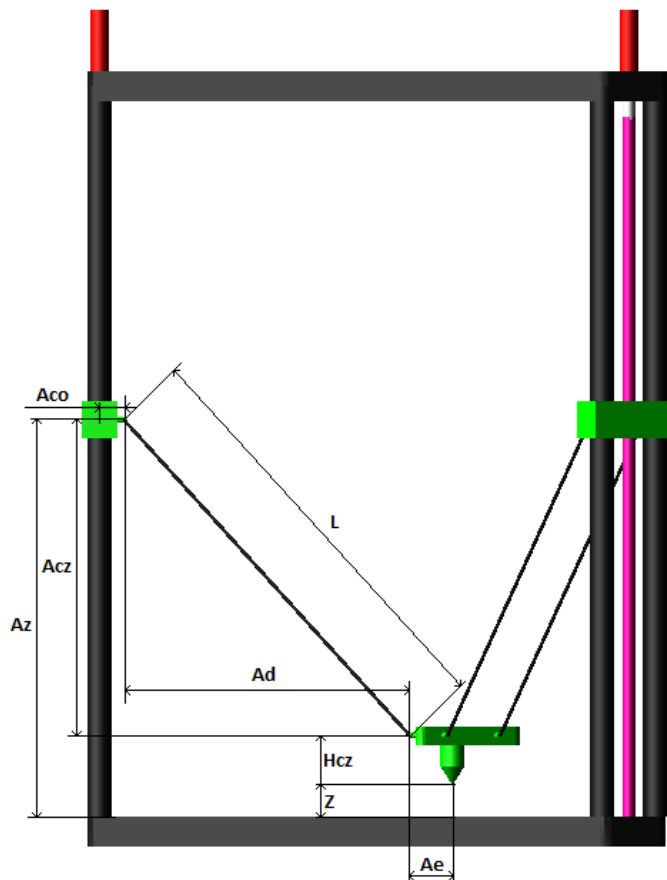
V našom prípade máme požadované X , Y a Z koordináty efektora a potrebujeme vypočítať polohy manipulátorov (A_z , B_z a C_z), ktoré zaručujú pohyb robota do tejto pozície. Určiť natočenia spojovacích telies je pre nás zbytočné. V prvom rade musíme definovať koordinačný systém. Použijeme karteziánske súradnice so stredom v strede základne.



Obr. 3.1: Koordinačný systém tlačiarne

Položíme manipulátor A na kladnú stranu osy x a do vzdialenosti R . Ostatné manipulátory (B a C) budú v tej istej vzdialenosti od stredu ale pod uhlom 120° , respektíve 60° od osy x . Súradnice ťažísk telies A, B a C je vidno na obrázku, kde R_c predstavuje celkový polomer základne. Jeho veľkosť je daná rovnicou (3.1).

$$R_c = A_{co} + A_d + A_e \quad (3.1)$$



Obr. 3.2: Tlačiareň z profilu

Na ďalšom obrázku (obr. 3.2) sú zakótované najdôležitejšie rozmery potrebné k výpočtu inverznej kinematiky. Zároveň je tu jasne vidno, že naším cieľom je určiť len hodnoty A_z , respektíve B_z a C_z , t.j. polohu manipulátoru, pretože x -ové a y -ové súradnice sa nemenia.

$$A_z = A_{cz} + H_{cz} + Z \quad (3.2)$$

Rozmer L a A_d sme zvolili a rozmer A_{cz} dopočítal program MSC.ADAMS z pytagorovej vety 3.3.

$$L^2 = A_{cz}^2 + A_d^2 \quad (3.3)$$

Ďalej je nutné povedať, že ak je manipulátor upevnený na dvoch zvodidlách, tak sa nemôže otáčať, ale iba posúvať v smere osy z (má 1 stupeň voľnosti) a keďže je s efektorom spojený dvomi tyčami (dĺžky L), ktoré mu odoberajú 3 stupne voľnosti (t.j. rotácie), tak tento efektor má len 3 stupne voľnosti a tými sú pohyb v osi x , y a z . Z toho vyplýva, že rozmer A_e sa pri jednom pohľade nemení ani pri pohybe manipulátorov. Tak isto sa nemení rozmer A_{co} . Keďže sú tieto hodnoty konštantné, môžeme upraviť rovnicu 3.1.

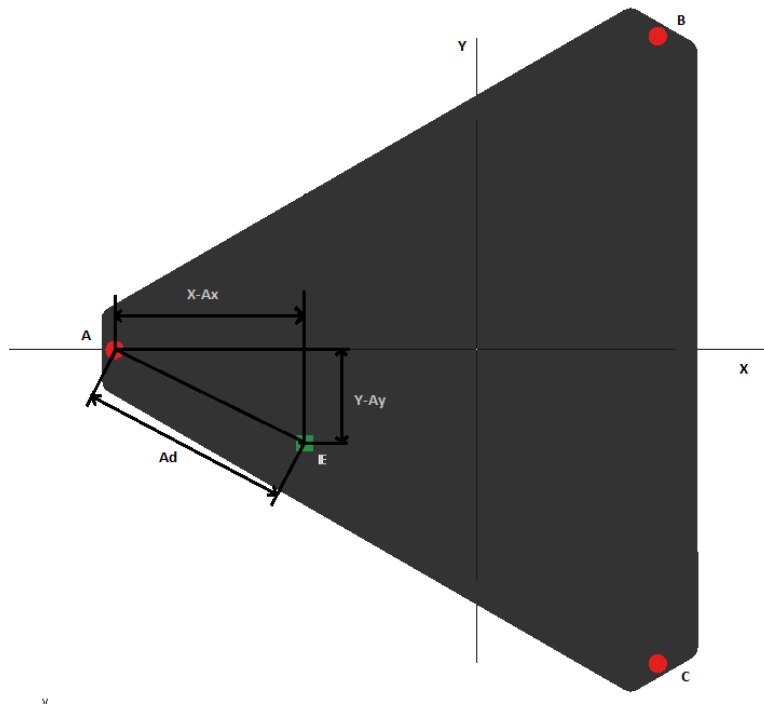
$$R_C = A_d + \text{konšt} \quad (3.4)$$

Túto konštantu môžeme vylúčiť a posunúť stĺpce, po ktorých sa pohybujú manipulátory do virtuálneho polomeru R , ktorý je veľkosťou rovný hodnote A_d , ale iba pri počiatocnej polohe, t.j. keď je poloha efektoru $[0, 0, 0]$. Virtuálne pozície telies A, B a C sú teda z obrázku 3.1 zjavné.

tab. 3.1: poloha manipulátorov

A	$[-R, 0]$
B	$[R \cdot \sin 30, R \cdot \cos 30]$
C	$[R \cdot \sin 30, -R \cdot \cos 30]$

Na obrázku 3.3 je znázornená požadovaná pozícia efektoru označená písmenom E vo virtuálnom priestore daná súradnicami X a Y . A_x predstavuje x -ovú súradnicu telesa A a A_y zase y -ovú. Z pytagorovej vety je nám jasná rovnica 3.5.



Obr. 3.3: Poloha efektoru

$$A_d^2 = (X - A_x)^2 + (Y - A_y)^2 \quad (3.5)$$

Spojením rovníc 3.5 a 3.3 dostávame rovnicu 3.6 a z nej potom vyjadrením A_{cz} rovnicu 3.7.

$$L^2 - A_{cz}^2 = A_d^2 = (X - A_x)^2 + (Y - A_y)^2 \quad (3.6)$$

$$A_{cz} = \sqrt{(L^2 - (X - A_x)^2 - (Y - A_y)^2)} \quad (3.7)$$

Napokon ak chceme získať finálnu rovnicu pre A_z , musíme spojiť rovnice 3.2 a 3.7.

$$A_z = \sqrt{(L^2 - (X - A_x)^2 - (Y - A_y)^2)} + H_{cz} + Z \quad (3.8)$$

Podobná rovnica sa dá použiť aj pre výpočet B_z , respektíve C_z .

Viac informácií v nižšie uvedenom zdroji [4].

3.2 Overenie správnosti inverznej kinematiky

K overeniu správnosti nami vypočítanej inverznej kinematiky najlepšie poslúži MATLAB, kde budeme môcť výsledky prezentovať v grafoch. Vytvorením skriptu, importovaním dát z ADAMS a následným výpočtom polôh manipulátorov a vykreslením, získame požadované grafy. Použitý skript je na obrázku 3.4.

```
vytokX=importdata('vytokX');
vytokY=importdata('vytokY');
vytokZ=importdata('vytokZ');
Az=importdata('Az');
Bz=importdata('Bz');
Cz=importdata('Cz');
```

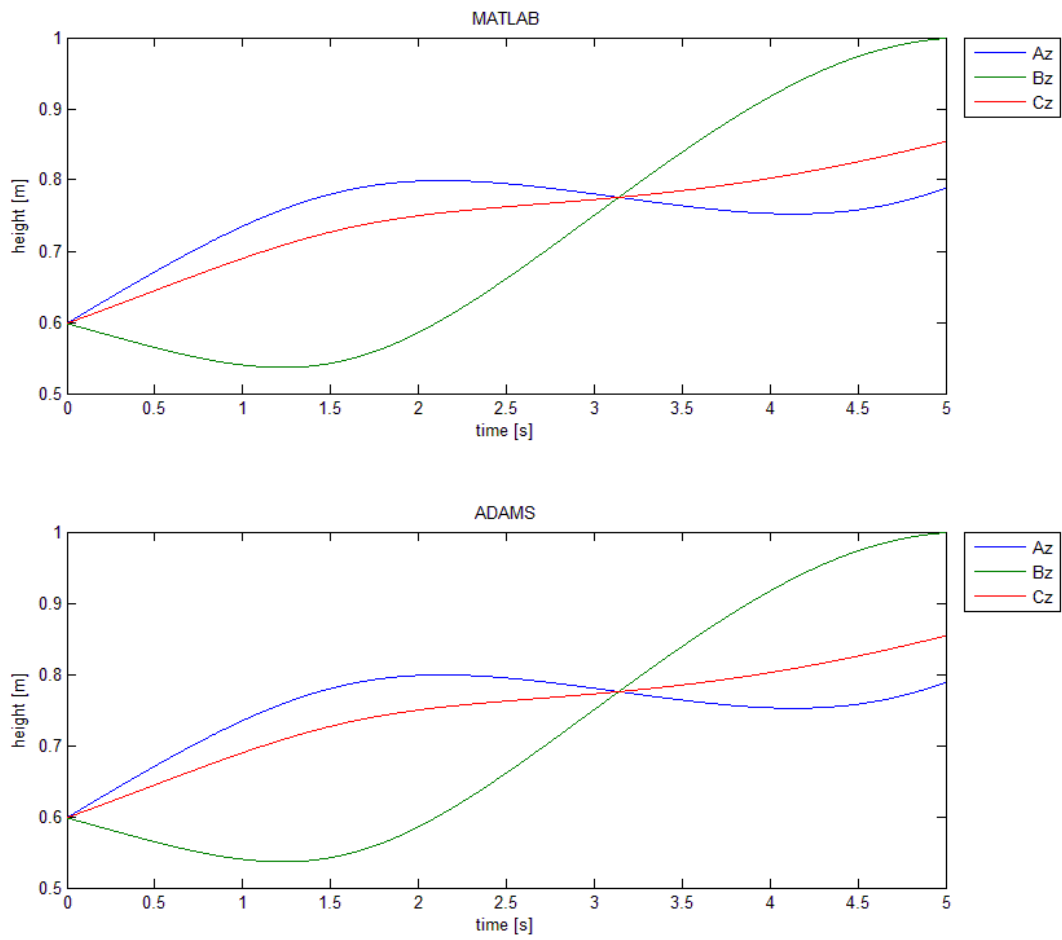
```
Y=0.001:0.001:5.001;
L=0.7;
R=0.47;
Hez=0.08;
```

```
for i=1:5001
    AzMatlab(i)=sqrt((L)^2-(vytokY.data(i))^2-(vytokX.data(i)+R)^2)+vytokZ.data(i)+Hez;
end
for i=1:5001
    BzMatlab(i)=sqrt((L)^2-(vytokY.data(i)-sqrt(3)*R/2)^2-(vytokX.data(i)-R/2)^2)+vytokZ.data(i)+Hez;
end
for i=1:5001
    CzMatlab(i)=sqrt((L)^2-(vytokY.data(i)+sqrt(3)*R/2)^2-(vytokX.data(i)-R/2)^2)+vytokZ.data(i)+Hez;
end
```

Obr. 3.4: Skript na výpočet kinematiky

V ADAMS sme vytvorili pohyb efektoru po kvázi-náhodných krivkách, ktorými bola nejaká kombinácia sínusov a kosínusov. Pozíciu efektoru sme uložili do troch súborov 'vytokX', 'vytokY' a 'vytokZ', ktoré nám slúžili k výpočtu vo vyššie uvedených for cykloch. Pozície manipulátorov sme zase uložili do súborov 'Az', 'Bz' a 'Cz'.

Vykreslené polohy manipulátorov A, B a C je možné vidieť v grafoch na obrázku 3.5, ktoré sme získali porovnaním hodnôt z premenných Az a AzMatlab, respektíve Bz a BzMatlab a Cz a CzMatlab. Rozdiel medzi experimentálnymi hodnotami z ADAMS a vypočítanými v MATLAB sú minimálne (asi len niekoľko nanometrov) a aj to len z dôvodu nepresnosti vytvorenia modelu a zaokrúhľovania. Dá sa teda povedať, že naša analýza inverznej kinematiky bola správna.



Obr. 3.5: Overenie kinematiky

4 Model elektro-mechanického aktuátora

Pre náš model sme zvolili DC motor, t.j. jednosmerný elektromotor. Je to točivý stroj napájaný jednosmerným prúdom. Jeho výhodou je, že sa ľahko riadi a to len zmenou budiaceho napätia, keďže závislosť otáčok na to tomto napätí je lineárna. Najjednoduchšie riadenie je pomocou PID regulátora.

Motor a prevodovku sme vyberali od firmy Maxon. Prevod nemusí byť veľký, pretože je dostatočne nahradený skrutkou. Zvolili sme DC motor RE 30 Order Number 310008 a planetárnu prevodovku GP 32 A Order Number 166155 [5].

tab. 4.1: parametre motoru a prevodu [5]

Výkon	60 W
Nominálne napätie	36 V
Nominálna rýchlosť	7840 ot/min
Nominálny krútiaci moment	86.6 mNm
Nominálny prúd	2.28 A
Odpor kotvy	1.43 Ω
Indukčnosť	0.281 mH
Konštanta stroja	39.8 mNm/A
Moment zotrvačnosti rotora	33.1 gcm^2
Prevod	3.7
Moment zotrvačnosti prevodovky	1.5 gcm^2
Maximálna efektívnosť	80%

4.1 Analýza DC motoru

Pre jednosmerný motor platia dve základné rovnice. Rovnica napät'ová (4.1) a rovnica momentová (4.2).

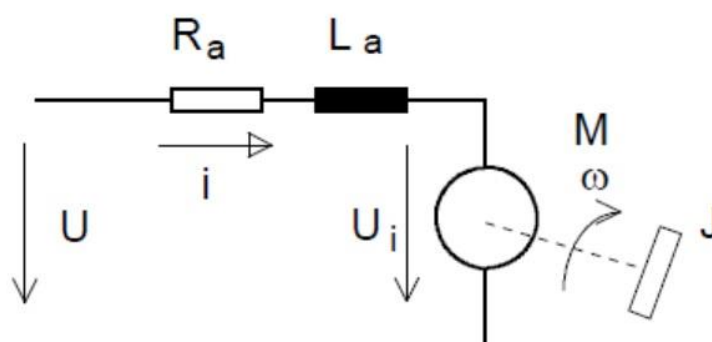
$$U_i = C\phi\omega \quad (4.1)$$

$$M = C\phi I \quad (4.2)$$

Vo vinutí kotvy sa indukuje napätie U_i , ak sa motor otáča uhlovou rýchlosťou ω a prechádza magnetickým tokom ϕ , kde C je konštrukčná konštanta stroja. Ak prechádza vinutím prúd I , tak na motore vzniká elektromagnetický moment M podľa rovnice 5.2.

Jednosmerný elektromotor môžeme vyjadriť náhradnou schémou (obrázok 4.1). Tá je zložená zo sériovo zapojeného rezistoru R_a , cievky L_a a zdroja jednosmerného napätia U . Podľa 2. Kirchhoffovho zákona je súčet všetkých svorkových napätí prvkov elektrického obvodu v ľubovoľnej slučke nulový. Ak tento zákon aplikujeme na našu náhradnú schému a využijeme aj rovnicu 4.1, dostaneme rovnicu 4.3.

$$U = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + C\phi\omega \quad (4.3)$$



Obr. 4.1: Náhradná schéma DC motoru [6]

Druhú momentovú rovnicu (4.4) môžeme odvodiť zo zákona zachovania momentu.

$$C\phi i = B\omega + J \frac{d\omega}{dt} + M_0 \quad (4.4)$$

Moment rotora z rovnice 4.2 je na ľavej strane rovnice, $B\omega$ je moment od viskózneho trenia a J je moment zotrvačnosti rotora. Túto rovnicu použijeme na výpočet krútiaceho momentu v prostredí MSC.ADAMS, pričom nám bude stačiť jej ľavá strana, nakoľko tento software má jej pravú stranu zahrnutú vo svojom výpočtovom modeli.

Aby sme mohli merať elektrický prúd prechádzajúci vinutím, potrebujeme rovnicu 4.3 upraviť do nasledujúceho tvaru.

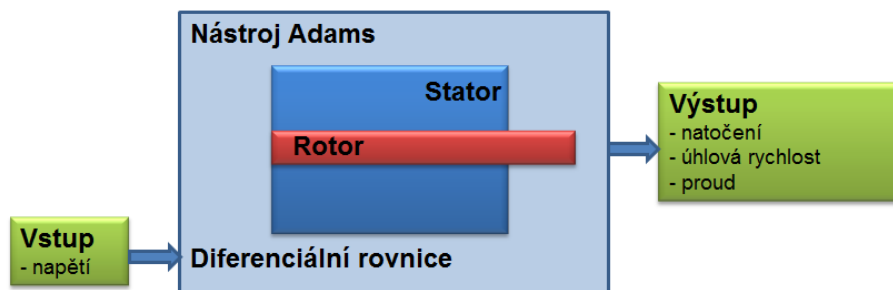
$$\frac{di}{dt} = -\frac{R_a}{L} i - \frac{C\phi}{L} \omega + \frac{1}{L} U \quad (4.5)$$

Túto rovnicu môžeme priamo použiť v modeli elektrického jednosmerného motoru.

Viac informácií o jednosmerných motoroch v nižšie uvedenej literatúre [6].

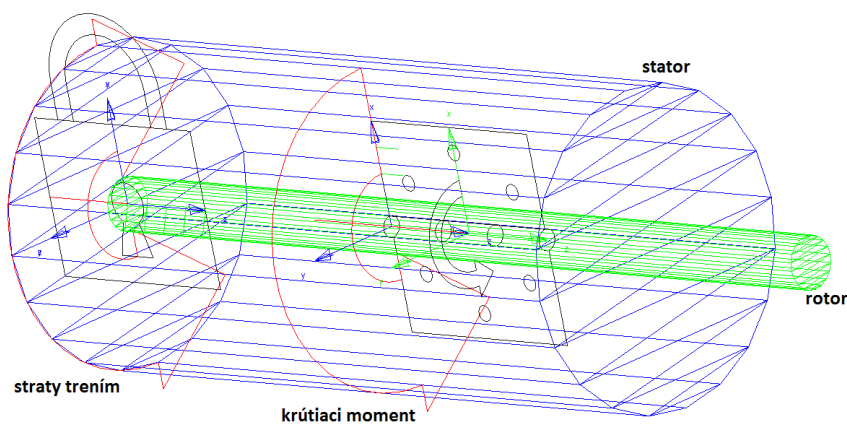
4.2 Vytvorenie modelu DC motoru

Zjednodušený model sme vytvorili v prostredí MSC.ADAMS podľa obrázku 4.2, na ktorom je možné vidieť z čoho sa skladá náš motor, aké ma vstupy a aké výstupy. Vstupom je napätie, ktoré privedieme na svorky motora a na výstupe môžeme pozorovať ako sa mení natočenie, uhlová rýchlosť a prúd v čase. Diferenciálnymi rovnicami sa rozumejú rovnice z kapitoly 4.1.



Obr. 4.2: Schéma usporiadania modelu v MSC.ADAMS [7]

Vytvorený model podľa obrázku 4.3 obsahuje tieto komponenty: stator, rotor, pevné spojenie so zemou, rotačná geometrická väzba, krútiaci moment rotoru a straty trením.



Obr. 4.3: Model motora v MSC.ADAMS

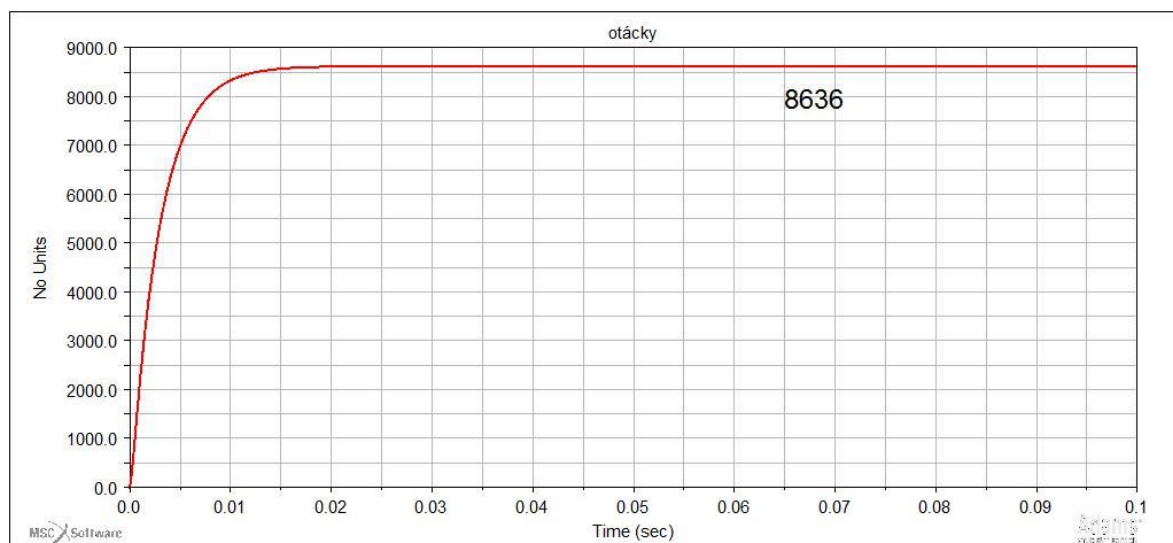
4.3 Overenie správnosti modelu DC motoru

Po vytvorení modelu nasleduje overenie jeho správnosti. Priebehy prúdu a otáčok na motore porovnáme s tabuľkovými hodnotami dodanými od spoločnosti Maxon [5].

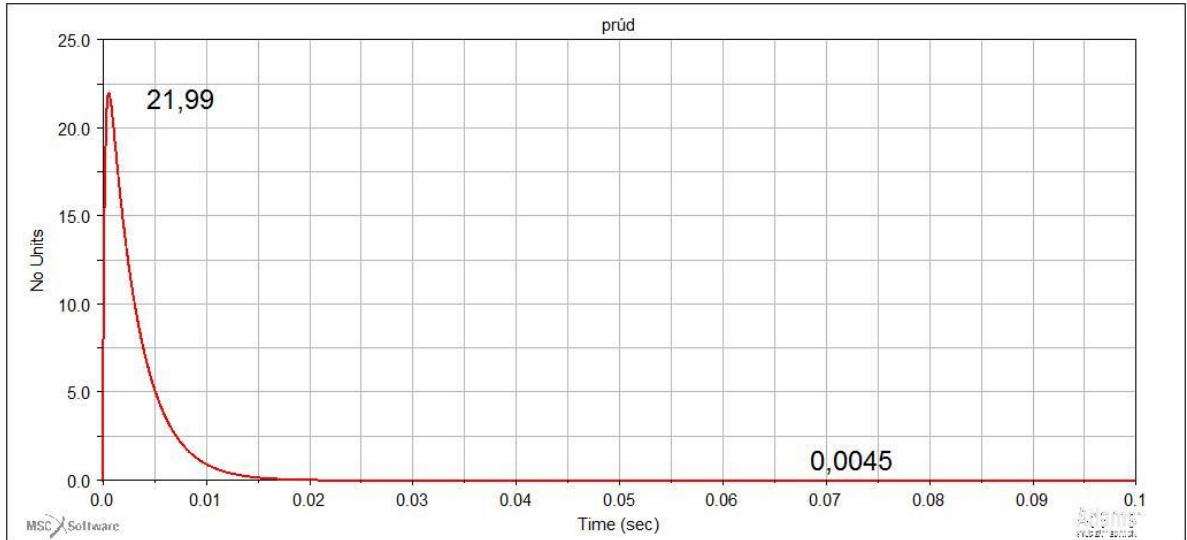
tab. 4.2: parametre motoru

otáčky bez záťaže	8590 ot/min
prúd bez záťaže	106 mA
nominálne otáčky	7840 ot/min
nominálny prúd	2.28 A
rozbehový prúd	25.2 A

Grafy boli vytvorené v postprocesore softwaru ADAMS.

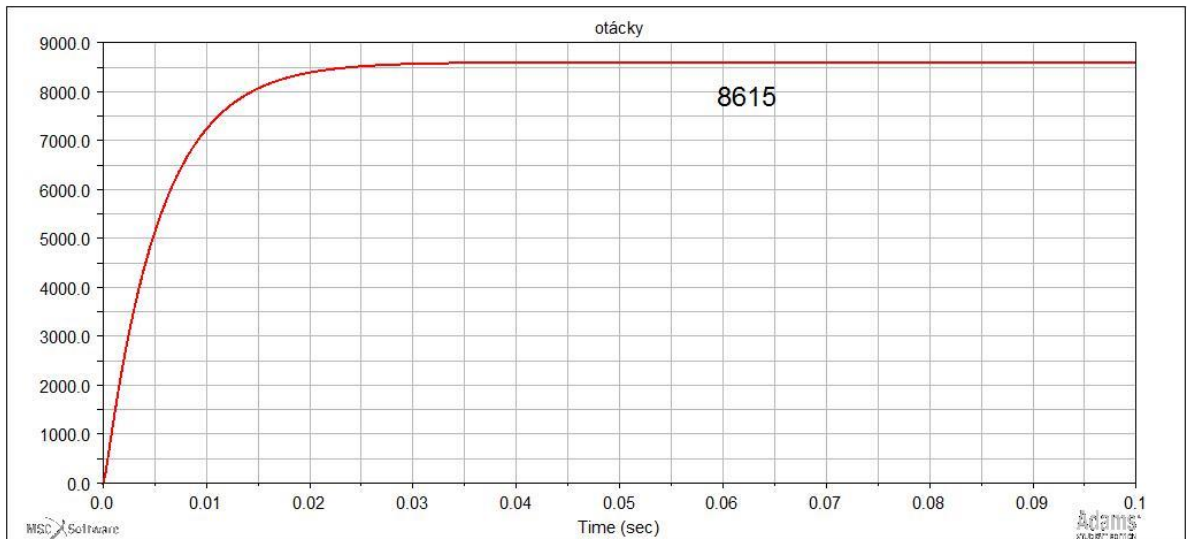


Obr. 4.4: Otáčky motoru bez záťaže

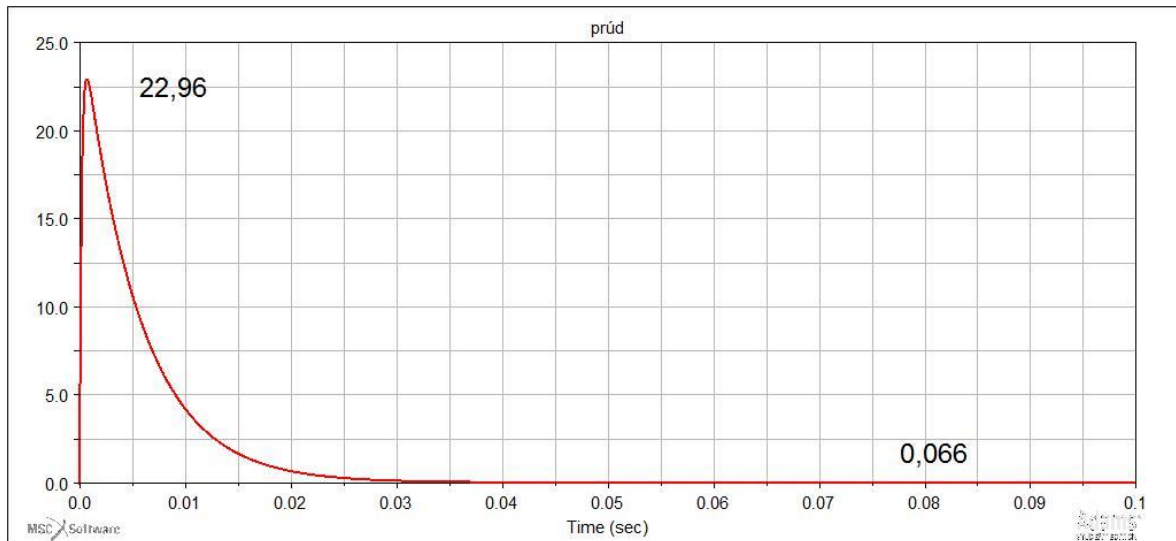


Obr. 4.5: Prúd motorom bez záťaže

Otáčky nezaťaženého motoru dosiahli hodnotu 8636 za minútu, pričom katalógová hodnota je 8590. Toto meranie sa dá nazvať presným. Rozbehový prúd motoru by mal byť 25.2 A, ale toto tvrdenia sa nám nepodarilo overiť v simulácií. Nepresnosť bola určite spôsobená nepresnosťou koeficientu trenia medzi rotorom a statorom, pretože túto veličinu spoločnosť Maxon neudáva a my sme ju len odhadli. Prúd motorom po ustálení sa tak isto nezhoduje a to dosť podstatne.



Obr. 4.6: Otáčky motoru so záťažou



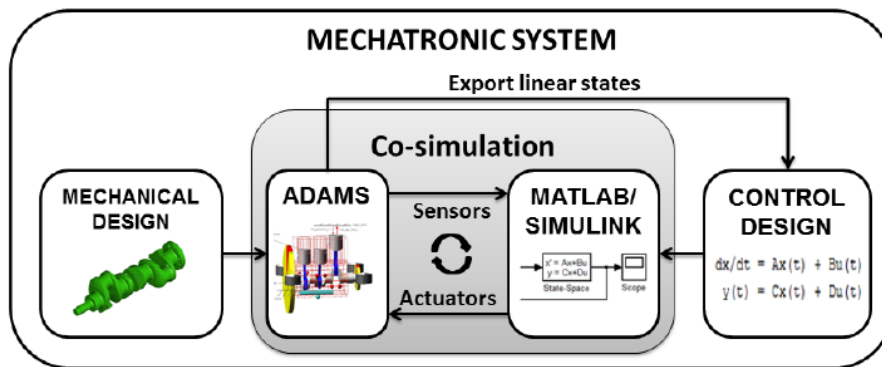
Obr. 4.7: Prúd motorom so záťažou

Otáčky motoru so záťažou boli len o málo menšie ako bez záťaže, avšak mechanická časová konštanta (čas, za ktorý sa rotor rozbehne na 63% konečných ustálených otáčok) bola o poznanie rozdielna. U nezaťaženého motoru to bolo $T=3,1$ ms a u zaťaženého $T=5,5$ ms. Nominálny prúd, čiže maximálny nepretržitý prúd, ktorý motor vydrží, je 2,28 A, to znamená, že pri maximálnej záťaži v našom prípade sme ďaleko za bezpečnou hranicou. Motor teda vydrží aj väčšiu záťaž.

5 Co-simulácia medzi ADAMS a MATLAB

V spoločnej simulácii dvoma programami zároveň, je potrebné, aby sme definovali parametre, ktoré si budú tieto programy predávať a tak riadiť model v reálnom čase. Na obrázku 4.2 je presne vidieť, ktoré premenné to sú. Takisto je veľmi dôležité aby pracovali na rovnakej architektúre (32-bit alebo 64-bit). My sme použili študentskú verziu MSC.ADAMS 2014.0.1 32-bit a MATLAB R2013b 32-bit. Tieto verzie sú vzájomne kompatibilné.

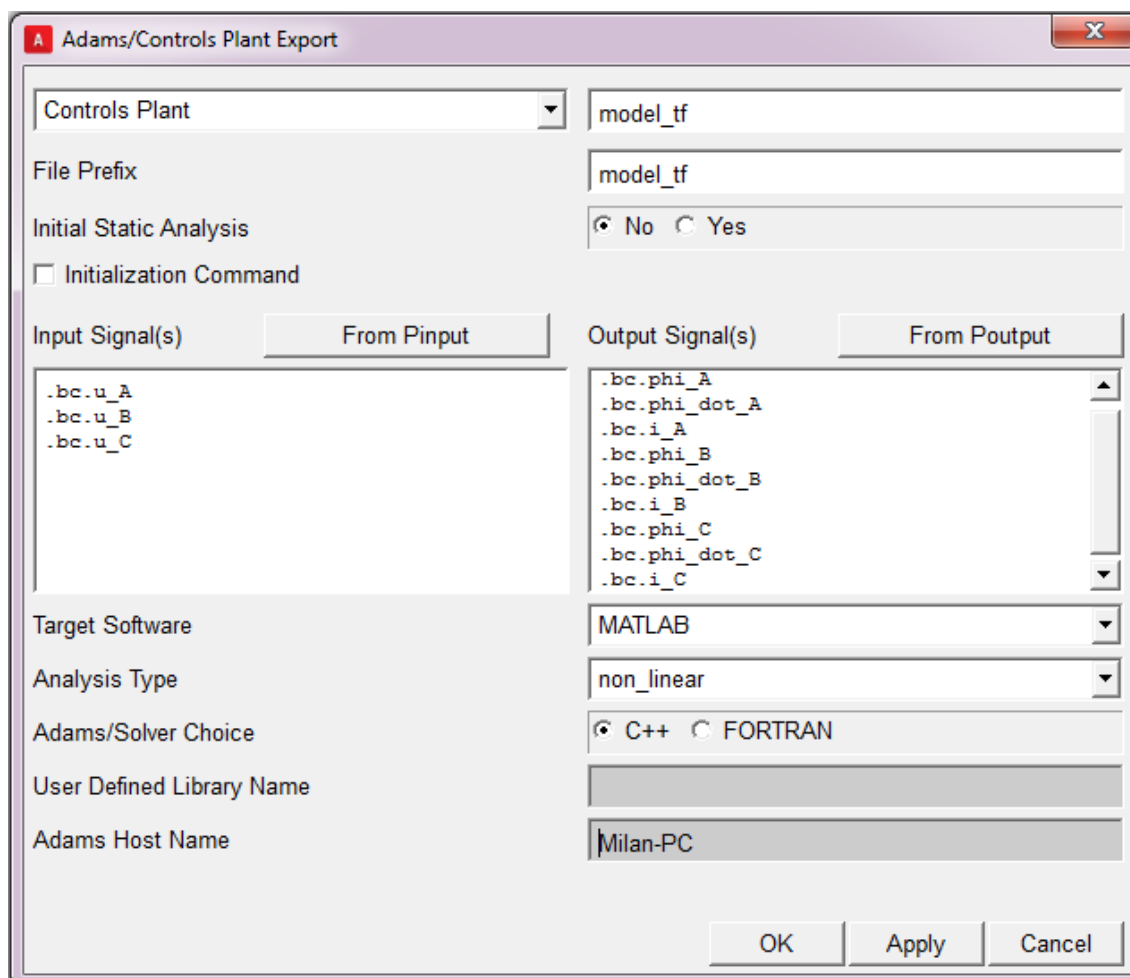
Príklad co-simulácie medzi týmito programami je na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Co-simulácia ADAMS-MATLAB/SIMULINK [8]

5.1 ADAMS/Controls Plant Export

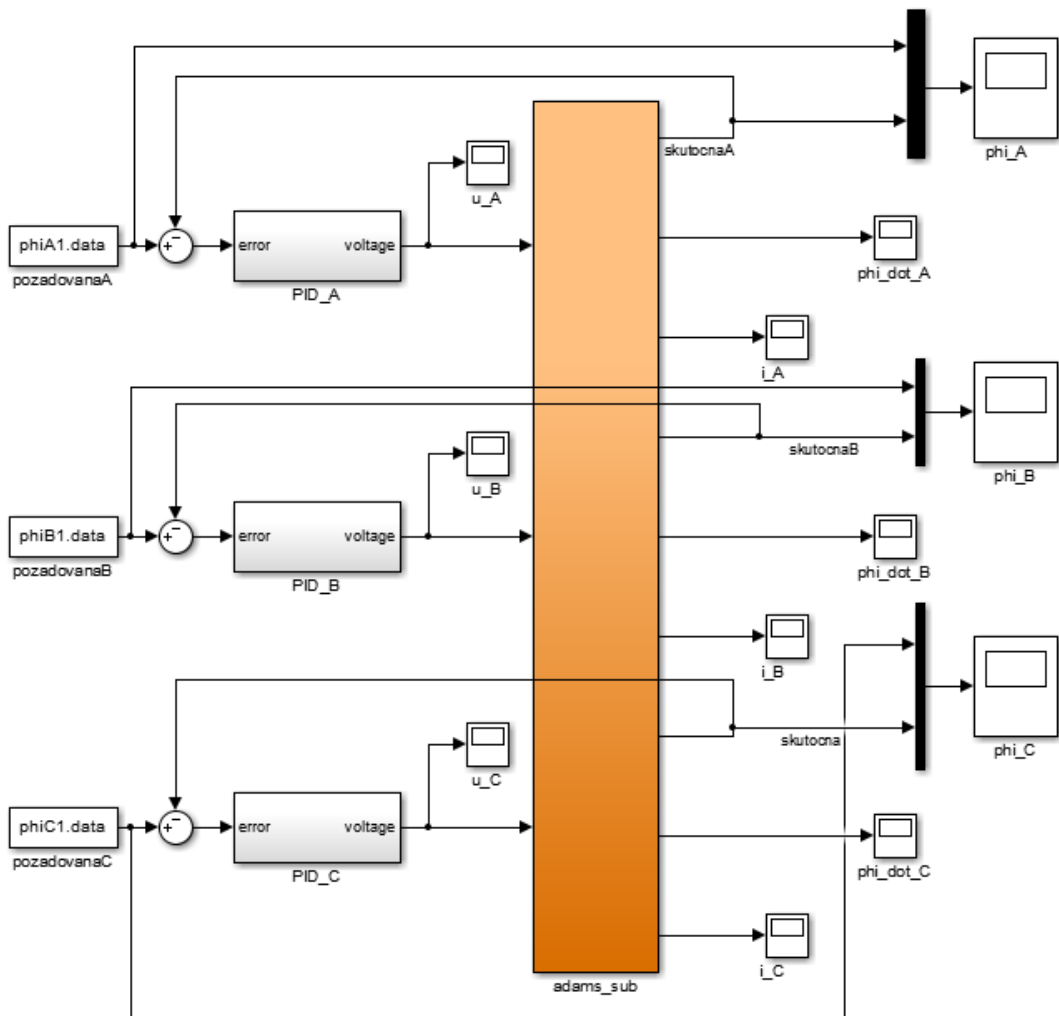
Na export nelineárneho modelu tlačiarne s tromi motormi (1 pre každý manipulátor) použijeme funkciu Plant Export pod príkazom *Controls* → *Plant Export* (obrázok 5.2). Vstupnými signálmi sú napätia na všetkých troch motoroch a výstupnými sú zase natočenie, zrýchlenie a prúd, rovnako, na všetkých troch motoroch. Model je exportovaný ako nelineárny s nastaveným cieľovým softwarom MATLAB a riešičom C++. Ďalšou možnosťou je exportovať tento model ako lineárny. To by malo za následok priame vytvorenie matíc A, B, C a D pre popis stavového priestoru.



Obr. 5.2: ADAMS/Controls plant export

5.2 Návrh riadenia

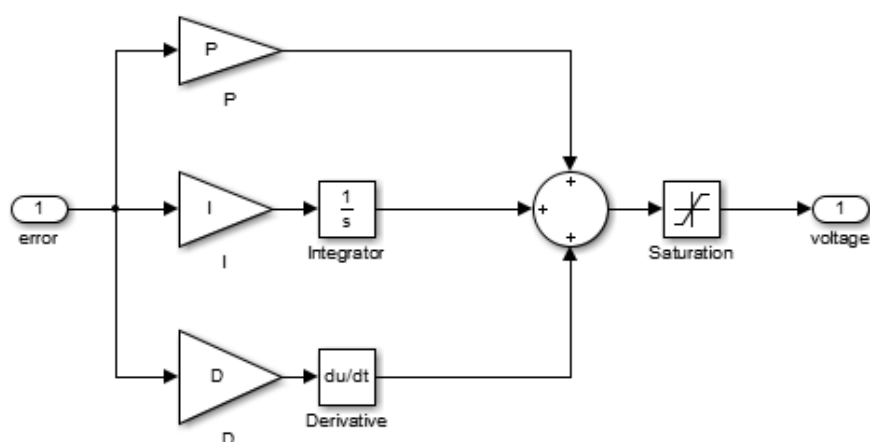
Po úspešnom exportovaní modelu do m-filu, musí byť tento súbor spustený v prostredí MATLAB a po zadaní príkazu *adams_sys* [9] sa vytvorí model motorov v SIMULINK zložený z bloku *adams_sub* a blokov vstupov a výstupov. Riadenie nášho modelu prebieha pomocou troch PID regulátorov v regulačných polohových slučkách (obrázok 5.3).



Obr. 5.3: Regulačná slučka pre riadenie motorov

5.3 PID regulátor

PID regulátor čiže proporcionálny, integračný plus derivačný regulátor je najrozšírenejším lineárnym regulátorom pre DC motory. Každá z jeho zložiek má nastaviteľné zosilnenie a ich vhodným nastavením môžeme celkom presne regulovať zmenu hodnoty na žiadanú. V našom prípade sa budeme snažiť o dosiahnutie presnej polohy rotora voči statoru, čiže hodnoty φ , ktorá priamo odpovedá polohe manipulátora z kapitoly 3. Tento PID regulátor teda môžeme nazvať *polohový regulátor*. K riadeniu nám pomôže regulačná slučka so spätnou väzbou. Schéma nášho regulátoru je na obrázku 5.4. Saturácia je potrebná k tomu, aby napätie nepresiahlo nominálnu hodnotu motora 36 V.



Obr. 5.4: PID regulátor

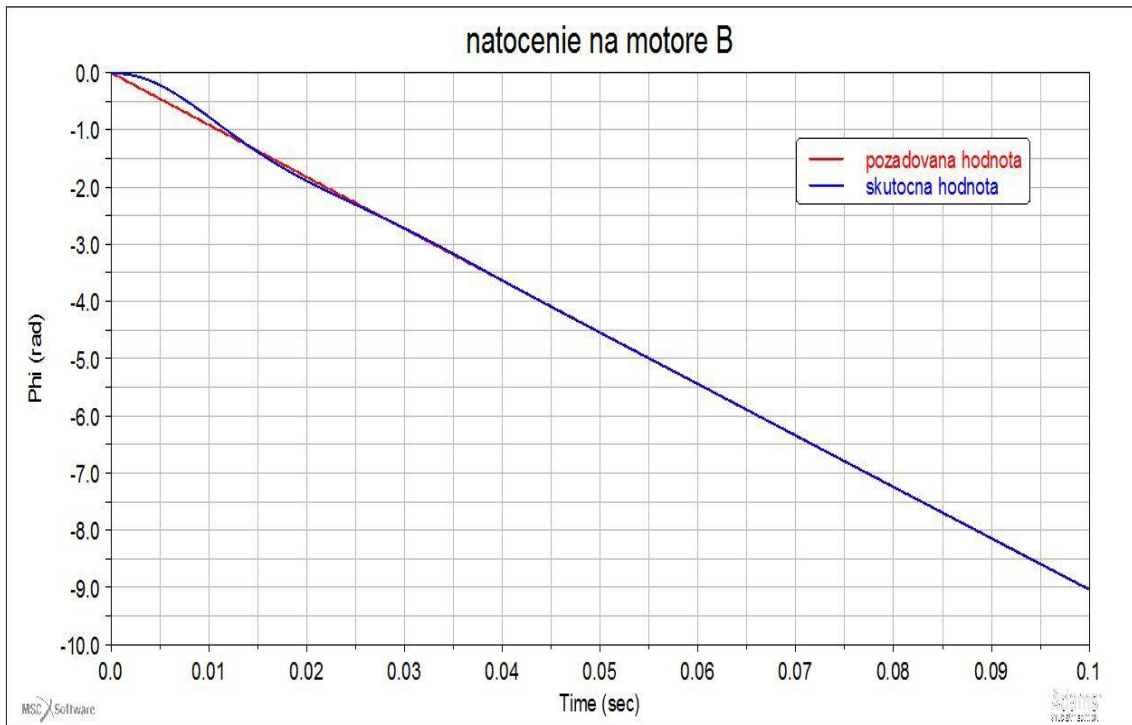
Regulátor je možné nastaviť buď výpočtom alebo odhadom. My sme zvolili nastavenie odhadom, pretože je to jednoduchšie a rýchlejšie. Najprv sme vyradili zásah členov I a D a postupne sme zvyšovali zosilnenie P až na kritickú hodnotu. Po jej prekročení sme začali toto zosilnenie znižovať až na takú hodnotu, ktorá je kompromisom medzi prekmitom a rýchlosťou dosiahnutia požadovanej hodnoty. Ďalej sme zvyšovali člen I až do požadovanej hodnoty a napokon aj člen D.

Finálne parametre PID regulátoru sú nasledovné:

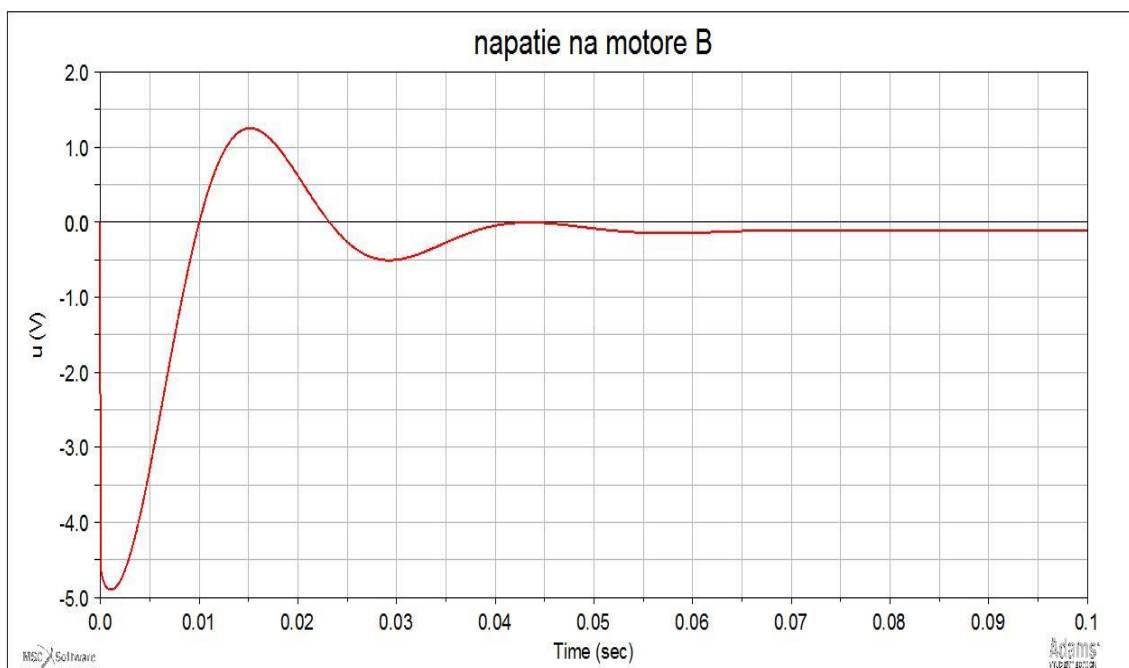
- $P = 12$
- $I = 8$
- $D = 0.05$

5.4 Simulácia chovania motoru s PID regulátorom

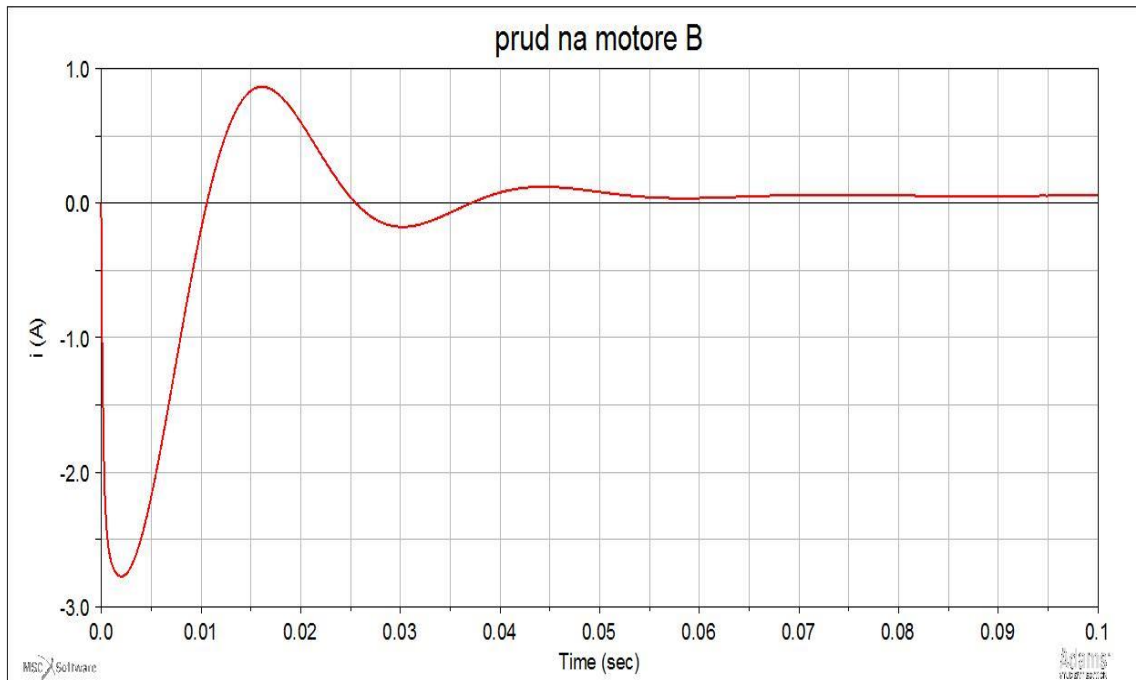
V tomto experimente sme najprv definovali daný útvar, ktorý by mala tlačiareň vytlačiť. Bol ním kruh o polomere 50 mm. Efektoru sme definovali pevnú rýchlosť 25 mm/s. Tento kruh bol teda vytlačený za 4π sekundy, čo je približne 12,56 sekundy. Tlačiareň začínala pohyb so svojej počiatkovej polohy [0,0,0]. Simuláciu sme najprv spustili na 0.1 sekundy, aby bolo vidieť, ako s akou presnosťou pracuje polohový PID regulátor pri rozbehu motoru (obrázok 5.5), pretože táto oblasť je najkritickejšia. V grafe je porovnávaná žiadaná hodnota a hodnota skutočná.



Obr. 5.5: Natočenie rotoru B pri rozbehu

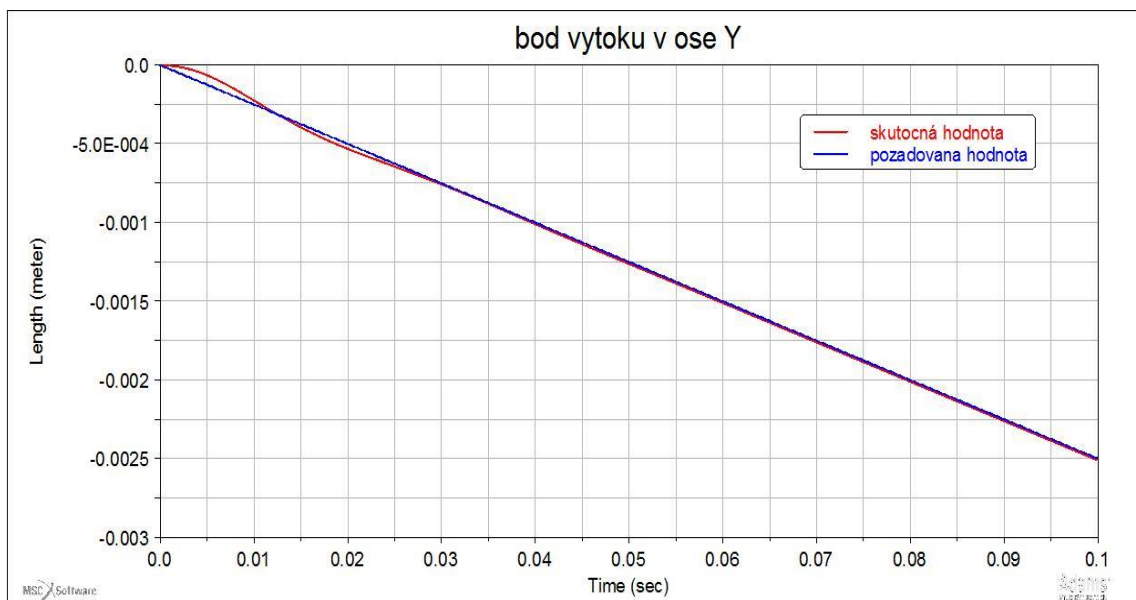


Obr. 5.6: Napätie na motore B



Obr. 5.7: Prúd na motore B

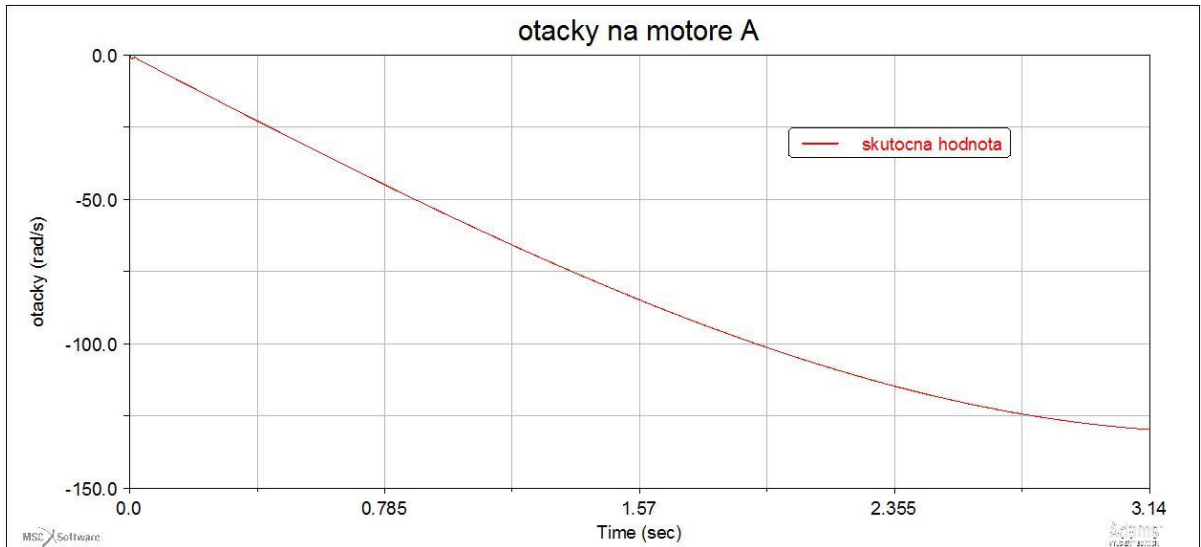
Pre porovnanie napríklad pozícia výtokového bodu efektoru v ose Y (obrázok 5.8).



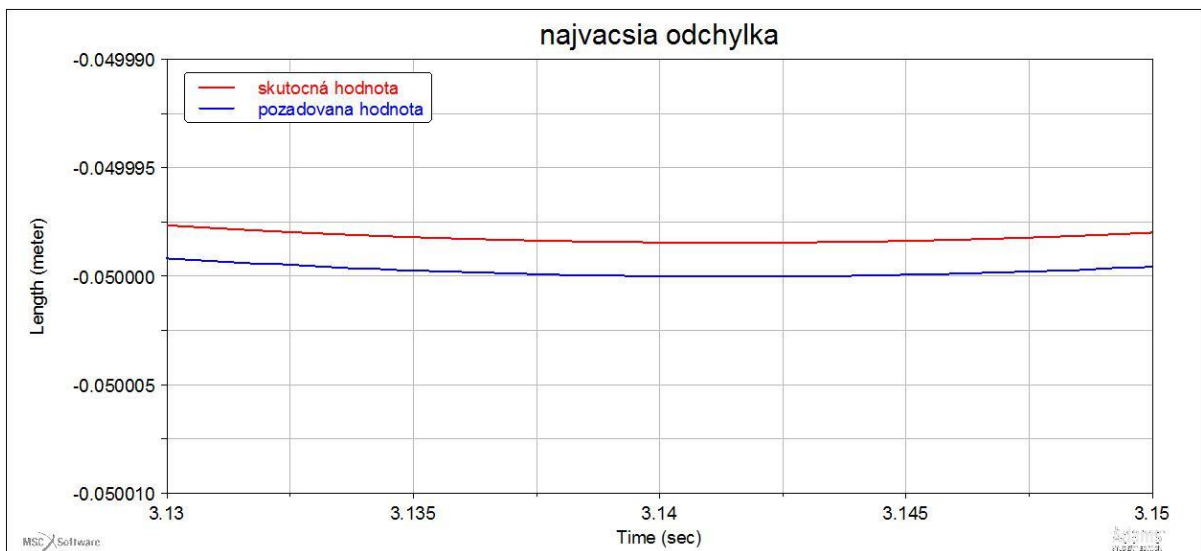
Obr. 5.8: Pozícia výtokového bodu efektoru v ose Y

Neskôr sme odsimulovali celý priebeh po kružnici (obrázok 5.11). Najväčšia odchýlka bola v prvých milisekundách merania. Neskôr bola najväčšia odchýlka pri

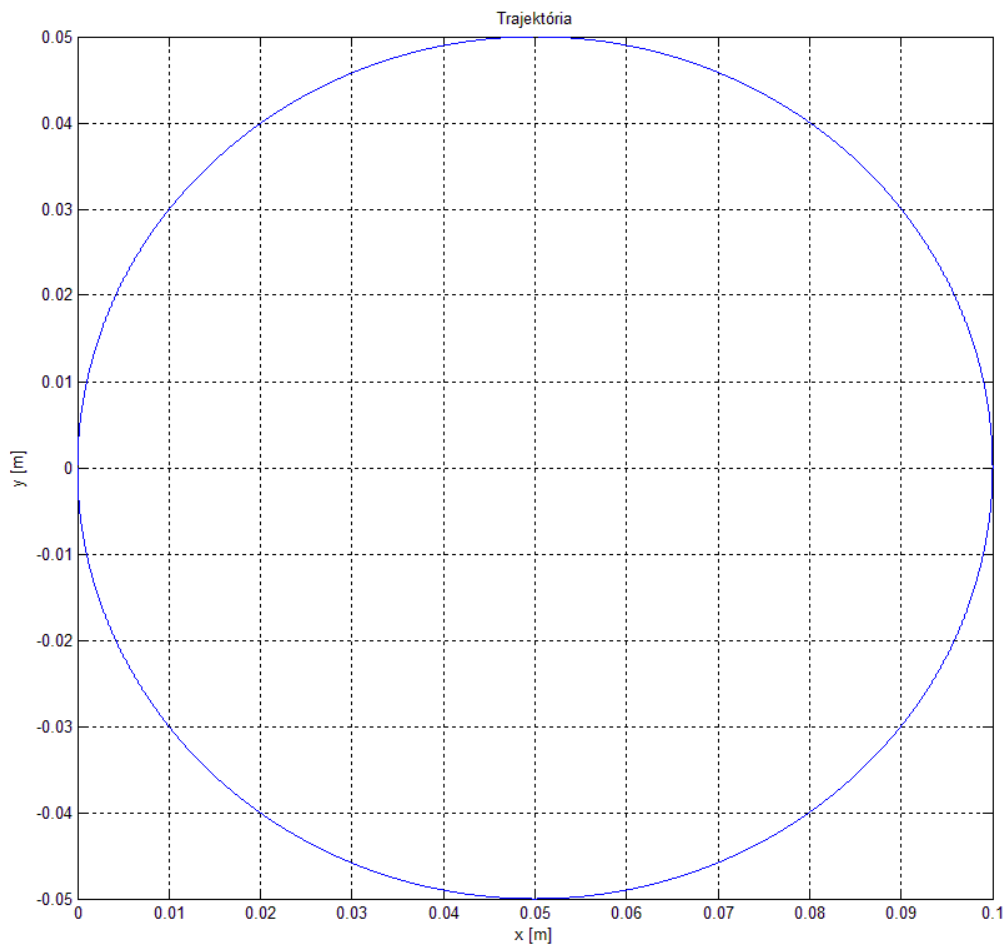
najväčších otáčkach dosiahnutých počas merania (asi 1300 otáčok za minútu (obrázok 5.9)) a to pri prepočítaní na polohu v ose Y, činilo približne asi len 2 mikrometre (obrázok 5.10), čo by pri rovnakej chybe vo všetkých troch osách mohlo viesť k maximálnej nepresnosti asi 4 mikrometre. Táto nepresnosť sa pri veľkosti našej tlačiarne a tlačených objektov dá považovať za veľmi malú.



Obr. 5.9: Otáčky na motore A



Obr. 5.10: Najväčšia nepresnosť



Obr. 5.11: Celková trajektória

Na obrázku 5.11 je zobrazená celková trajektória prejdená efektorom po krivke definovanej na začiatku kapitoly. Kruh o polomere 5 cm bol vytlačený len s malými nepresnosťami vid'. obrázky 5.8 až 5.10. Tlačiareň teda prešla po definovanej trase s veľkou presnosťou.

6 Záver

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvorenie virtuálneho prototypu mechatronickej sústavy. Toto zahŕňa tvorbu mechanickej časti, tvorbu elektro-mechanického aktuátora, prepojenia oboch modelov v co-simulačných prostrediach a návrh riadenia sústavy. V úvode práce bola analyzovaná kinematika tohoto stroja a overená jej správnosť. Neskôr vytvorenie modelu v ADAMS, ktoré so sebou nieslo veľa problémov a nutnosť naučiť sa v tomto softwari pracovať. V ďalšej časti bolo nutné analyzovať elektrickú časť jednosmerného motoru, aby sme mohli jeho správanie simulovať. K tomuto sme využili co-simulačného prepojenia ADAMS a MATLAB/SIMULINK, vďaka ktorému sme boli schopní navrhnuť PID regulátor na správne riadenie tejto mechatronickej sústavy. Testovaný prototyp fungoval správne a s dostatočnou presnosťou. Bolo by teda možné zadať ho do výroby s tým, že by potreboval ďalšie úpravy a návrh riadiaceho a CAD softwaru a ich prepojenia. Toto je však nad rámec bakalárskej práce. Môžeme teda konštatovať, že hlavný cieľ tejto bakalárskej práce bol splnený.

7 Zoznam použitej literatúry

- [1] Cartesian vs. delta printers. In: *MatterHackers Inc.* [online]. © 2016 MatterHackers Inc. 24.9.2015 [cit. 2016-3-20]. Dostupné z: https://www.matterhackers.com/articles/getting_started_with_3D_printing
- [2] Adams [online]. [cit. 2016-4-11]. Dostupné z: <http://www.mscsoftware.com/product/adams>
- [3] MATLAB [online]. [cit. 2016-4-11]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [4] Steve Graves. Johann C. Rocholl (Rostock) Style Delta Robot Kinematics. In: *RepRap* [online]. 2015 [cit. 2016-5-22]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/File:Rostock_Delta_Kinematics_3.pdf
- [5] Maxon motor catalog [online]. [cit. 2016-3-2]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog>
- [6] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony – skriptum*. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2001, 86 s. ISBN 80-214-1978-4
- [7] LYSÁK, J. *Virtuální prototyp elektrických strojů v ADAMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vetiška.
- [8] BŘEZINA, T.; HADAŠ, Z.; VETIŠKA, J. Using of Co-simulation ADAMS-SIMULINK for Development of Mechatronic Systems. In *PROCEEDINGS OF 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS*. Trenčín: AD University of Trenčin, 2011.s. 59-64. ISBN: 978-80-8075-476- 1.
- [9] Getting Started Using Adams/Controls [online]. 30.11.2011 [cit. 2016-4-7]. Dostupné z: <https://simcompanion.mscsoftware.com>

8 Zoznam použitých obrázkov

Obr. 2.1: Typy 3D tlačiarňí [1]	11
Obr. 2.2: Model tlačiarne	13
Obr. 3.1: Koordinačný systém tlačiarne	15
Obr. 3.2: Tlačiareň z profilu	16
Obr. 3.3: Poloha efektoru	18
Obr. 3.4: Skript na výpočet kinematiky	19
Obr. 3.5: Overenie kinematiky	20
Obr. 4.1: Náhradná schéma DC motoru [6]	22
Obr. 4.2: Schéma usporiadania modelu v MSC.ADAMS [7]	23
Obr. 4.3: Model motoru v MSC.ADAMS	23
Obr. 4.4: Otáčky motoru bez záťaže	24
Obr. 4.5: Prúd motorom bez záťaže	25
Obr. 4.6: Otáčky motoru so záťažou	25
Obr. 4.7: Prúd motorom so záťažou	26
Obr. 5.1: Co-simulácia ADAMS-MATLAB/SIMULINK [8]	27
Obr. 5.2: ADAMS/Controls plant export	28
Obr. 5.3: Regulačná slučka pre riadenie motorov	29
Obr. 5.4: PID regulátor	30
Obr. 5.5: Natočenie rotoru B pri rozbehu	31
Obr. 5.6: Napätie na motore B	31
Obr. 5.7: Prúd na motore B	32
Obr. 5.8: Pozícia výtokového bodu efektoru v ose Y	32
Obr. 5.9: Otáčky na motore A	33
Obr. 5.10: Najväčšia nepresnosť	33
Obr. 5.11: Celková trajektória	34