

Dynamická analýza a řízení pohybu robota typu SCARA se synchronními elektrickými stroji s permanentním magnetem

Bc. Radim Soukup

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Radim Soukup**
Osobní číslo: **A20204**
Studijní program: **N0714A150006 Automatické řízení a informatika v průmyslu 4.0 -**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Dynamická analýza a řízení pohybu robota typu SCARA se synchronními el. stroji s perm. magnetem.**
Téma práce anglicky: **Dynamic Analysis and Motion Control of a SCARA Robot with Synchronous Electrical Machines with Permanent Magnet**

Zásady pro vypracování

1. Na základě zavedených souřadných systémů podle DH a úplného kinematického popisu systému (transformační matice) odvodte pohybové rovnice robota typu SCARA TS2 60.
2. Na reálném zařízení zadejte pomocí v BP vypočítané inverzní úlohy požadované polohy bodu zápěstí pro dva typové pohyby v 3D prostoru (kružnice, „roh“). Vyhodnoťte přesnost pohybu porovnáním žádané a skutečné trajektorie pohybu.
3. Vytvořte simulační dynamický počítačový model s akčními členy se synchronními el. stroji s perm. magnetem reálného robota Staubli TS2 60, identifikujte jeho chování podle chování v bodu 2 a proveďte simulační experimenty s typovými žádanými pohyby.
4. Porovnejte výsledek simulačních experimentů s reálným měřením. Vysvětlete a interpretujte.

Rozsah diplomové práce: do 100 stran
Rozsah příloh: do 30 obrázků
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

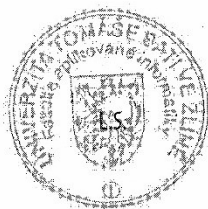
Seznam doporučené literatury:

1. Úředníček, Z.: Robotika, skripta UTB ve Zlíně, Zlín 2012, 978-80-7454-223-7
2. Siciliano, B., Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, ISBN: 978-3-540-23957-4, e-ISBN: 978-3-540-30301-5
3. Jazar, R. N.: Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control, Springer Science + Business Media, LLC, New York, 2007, ISBN-13:978-0-387-32475-3
4. Critchlow, A. J. Introduction to Robotics. New York: Macmillan, 1985. ISBN 0023255900
5. Siciliano B, Scàvico L, Villani L, Oriolo G (2009) Robotics: Modelling, planning and control. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce: 15. ledna 2022
Termín odevzdání diplomové práce: 20. května 2022

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 12. 5. 2022

Radim Soukup, v. r.
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá dynamickou analýzou robota SCARA od firmy Stäubli s názvem TS2 60. V teoretické části se nachází výčet základních témat nutných k provedení dynamické analýzy a nutný základ pro práci s programem Dynast.

Praktická část obsahuje výpočet pohybových rovnic uvedeného typu robotu, simulační model, experimenty a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova: SCARA, dynamika, kinematika, PMSM

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the dynamic analysis of the SCARA robot from the company Stäubli with a name TS2 60. The theoretical part contains a list of basic topics necessary to perform dynamic analysis and the minimum basis for working with the Dynast program.

The practical part contains the calculation of motion equations of this robot type, simulation model, experiments and their evaluation.

Keywords: SCARA, dynamics, kinematics, PMSM

Tímto chci poděkovat vedoucímu této diplomové práce doc. Zdeňkovi Úředníčkovi, CSc. za skvělé vedení práce, ochotu a motivaci. Dále chci poděkovat své rodině za jejich podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ROBOT SCARA TS2 60	11
1.1 KINEMATIKA	11
1.1.1 Přímá kinematická úloha	11
1.1.2 Inverzní kinematická úloha	14
1.2 POHYBOVÉ ROVNICE	15
1.2.1 Matice setrvačnosti.....	15
1.2.2 Huygens-Steinerova věta	15
1.2.3 Moment setrvačnosti tuhého homogenního kvádrového článku.....	17
1.2.4 Lagrangeova dynamika robotu.....	18
1.3 TRAJEKTORIE	18
1.3.1 Kruh.....	19
1.3.2 Roh	20
2 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ DYNAST	21
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMATA	21
2.1.1 Explicitní blok	21
2.1.2 Integrátor	22
2.1.3 Numerická derivace	22
2.1.4 Reference.....	22
2.1.5 Synchronní stroj s permanentním magnetem	22
2.1.6 Rotační tlumič	22
2.1.7 Zdroj průtokové veličiny	23
2.1.8 Převodovka.....	23
2.1.9 Rozdílový blok	23
2.1.10 PID regulátor	24
2.1.11 Tuhý rotační článek	24
3 PMSM	25
3.1 PARKOVA TRANSFORMACE.....	25
3.2 MODEL PMSM.....	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
4 POHYBOVÉ ROVNICE	32
5 SIMULAČNÍ MODEL	36
5.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	36
5.2 NASTAVENÍ REGULÁTORŮ	37
5.3 GENEROVÁNÍ TYPOVÉ TRAJEKTORIE	40
5.4 VÝSLEDKY SIMULACE	41
5.4.1 Kruh.....	41
5.4.2 Roh	45
5.5 MĚŘENÍ TYPOVÝCH TRAJEKTORIÍ NA ROBOTU TS2 60.....	50
5.5.1 Kruh.....	51
5.5.2 Roh	55

5.6	POROVNÁNÍ SIMULACE A MĚŘENÍ.....	60
5.6.1	Kruh.....	60
5.6.2	Roh.....	62
ZÁVĚR		64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		66
SEZNAM OBRÁZKŮ		67
SEZNAM TABULEK.....		69
SEZNAM PŘÍLOH.....		70

ÚVOD

Na stránkách výrobců robotů obecně bývají uvedeny technické dokumentace obsahující užitečné informace o možnostech robotu. Bohužel se již nelze dohledat informace o dynamickém chování. Tyto informace by však dokázaly zodpovědět na zajímavé otázky.

V průmyslu se roboty nejčastěji používají pro úkoly jako pick & place. Často je k tomuto úkonu využita nejkratší vzdálenost a robot se pohybuje po přímce nebo oblouku mezi definovanými body. Může se stát, že z nějakého důvodu toto nebude možné, naopak budeme nuceni využít jiné trajektorie. Co kdyby úkol před kterým stojíme, bylo osazování plošných spojů? Byl by tuto činnost robot TS2 60 schopen vykonávat? Na položenou otázku má tato práce odpověď.

Cílem této práce je provést dynamickou analýzu zvoleného robotu TS2 60 typu SCARA. Na základě zavedených souřadných soustav odvodit pohybové rovnice pro tento robot. Změřit typové trajektorie (kruh, roh) na reálném zařízení a simulaci. Pro tyto měření vyhodnotit přesnost. Nakonec porovnat simulaci a reálným měřením s interpretací a vysvětlením.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROBOT SCARA TS2 60

Robot typu SCARA je známá konfigurace, která v tomto případě má 4 osy v uspořádání R||R||T||R. Nejprve bude uvedeno seznámení s hardwarem robotu. Vzhledem k zamýšlenému generování trajektorií bude nutné znát tyto parametry daného robotu: [9]

Tabulka 1. Parametry robotu TS2 60[9]

Číslo osy	Rychlost osy	Rozpětí osy
1	0,55 [°/ms]	360 [°]
2	0,72 [°/ms]	300 [°]
3	2,5 [mm/ms]	200 – 400 [mm]
4	2,5 [°/ms]	1000 [°]

Rychlost osy bude později v kapitole generování trajektorie hrát tu roli, že bude určovat o kolik se další vzorek žádané hodnoty bude moct změnit tak, aby nedošlo k sepnutí bezpečnostní brzdy robotu, jeho zastavení a následnému přechodu do chyby. Dále je známo, že maximální možná dosažitelná vzdálenost mezi osou 1 až 4 je 620 mm a minimální možná dosažitelná vzdálenost mezi osou 1 až 4 je 210 mm. Spolu s informací o rozpětí os tímto získáme představu o pracovním prostoru, ve kterém se trajektorie může generovat.

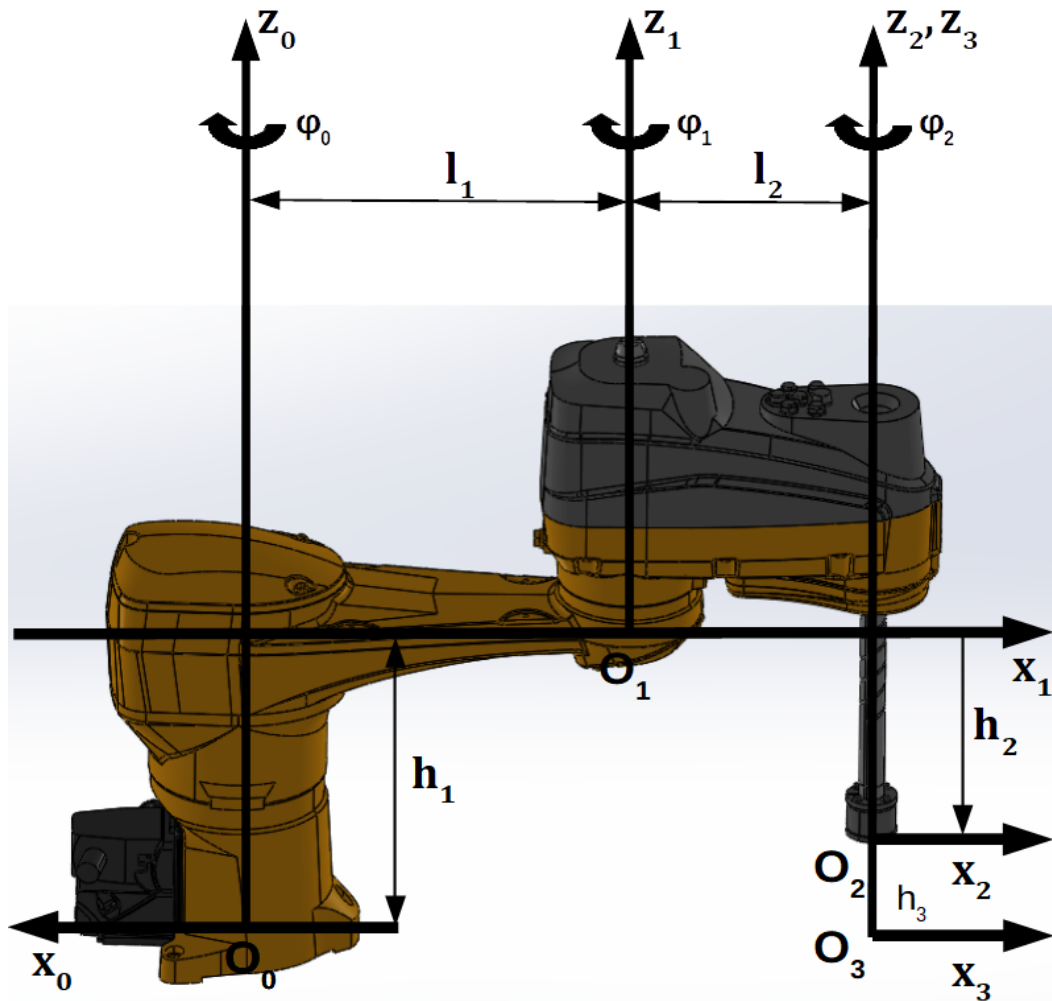
K programování bude využito Stäubli Robotic Suite, které bude komunikovat s druhým programem „UlohyUTB“, který je realizován pomocí LabView. Do tohoto programu budou nahrány žádané hodnoty, které se vygenerují tak, aby se pohyboval po dané trajektorii. Před samotným měřením je vhodné provést simulaci.

1.1 Kinematika

Pro generování trajektorie bude nutné mít nejprve hotovou inverzní kinematickou úlohu a pro tu je potřebné mít hotovou přímou kinematickou úlohu. [1]

1.1.1 Přímá kinematická úloha

Pomocí DH notace se nejprve zavedou souřadné soustavy do mechanického modelu robotu.[1]



Obrázek 1 Zavedené souřadné soustavy[8]

Pro takto zavedené souřadné soustavy platí následující tabulka DH parametrů. [1]

Tabulka 2 DH parametry[1]

Číslo článku	Parametry			
	a_i	α_i	d_i	Θ_i
1	l_1	0°	h_1	$180^\circ + \varphi_1$
2	l_2	0°	$-h_2$	$-\varphi_2$
3	0	0°	$-h_3$	$-\varphi_3$

Z vytvořené tabulky (2) s DH parametry se parametry dosadí do obecné homogenní transformační matice. Obecná homogenní transformační matice má tvar: [1]

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Pak transformační matice mezi jednotlivými články podle zavedených souřadných soustav jsou: [1]

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi_1) & \sin(\varphi_1) & 0 & -l_1 \cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1) & -\cos(\varphi_1) & 0 & -l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2) & \sin(\varphi_2) & 0 & l_2 \cos(\varphi_2) \\ -\sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & 0 & -l_2 \sin(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 & -h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_3) & \sin(\varphi_3) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_3) & \cos(\varphi_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Transformační matice koncového efektoru v globální souřadné soustavě se vypočítá vztahem: [1]

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (5)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & \sin(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & 0 & -l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & -\cos(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & 0 & -l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h_1 - h_2 - h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Násobením transformační matice 0T_3 polohou počátku ${}^B O_3$ zleva se dostane poloha počátku koncového efektoru v globální souřadné soustavě. [1]

$$\begin{aligned}
{}^G O_1 &= {}^0 T_3 \cdot {}^B O_3 = \\
&= \begin{bmatrix} -\cos(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & \sin(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & 0 & -l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & -\cos(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1) & 0 & -l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h_1 - h_2 - h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7) \\
\cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ -l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ h_1 - h_2 - h_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

1.1.2 Inverzní kinematická úloha

Z výsledku přímé kinematické úlohy v rovnici (7) se nyní vypočtou kloubové souřadnice pro jednotlivé klouby. [1]

Pro kloubové proměnné φ_1 a φ_2 řešíme tyto rovnice: [1]

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ -l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \sin(\varphi_1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pro kloubovou proměnnou φ_1 platí: [1]

$$\varphi_1 = \operatorname{atan} \left(\frac{-Y_e \cdot (l_1 + l_2 \cdot \cos(\varphi_2)) - X_e \cdot l_2 \cdot \sin(\varphi_2)}{-X_e \cdot (l_1 + l_2 \cdot \cos(\varphi_2)) + Y_e \cdot l_2 \cdot \sin(\varphi_2)} \right) \quad (9)$$

Pro kloubovou proměnnou φ_2 platí: [1]

$$\varphi_2 = \pm 2 \cdot \operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{(l_1 + l_2)^2 - (X_e^2 + Y_e^2)}{(X_e^2 + Y_e^2) - (l_1 - l_2)^2}} \right) \quad (10)$$

Pro kloubovou proměnnou h_2 platí: [1]

$$\begin{aligned}
h_1 - h_2 - h_3 &= Z_e \\
h_2 &= h_1 - h_3 - Z_e
\end{aligned} \quad (11)$$

Kloubovou proměnnou φ_3 nelze určit pomocí pozice koncového efektoru $[X_e, Y_e, Z_e]^T$.

Z toho důvodu se využije matice orientace spolu s funkcí tangens: [1]

$$\tan(\varphi_3 + \varphi_2 - \varphi_1) = \frac{\sin(\varphi_3 + \varphi_2 - \varphi_1)}{\cos(\varphi_3 + \varphi_2 - \varphi_1)} \quad (12)$$

Pak:

$$\begin{aligned}\varphi_3 + \varphi_2 - \varphi_1 &= \operatorname{atan}_2\left(\frac{\sin(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1)}{\cos(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1)}\right) \\ \varphi_3 &= -\varphi_2 + \varphi_1 + \operatorname{atan}_2\left(\frac{\sin(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1)}{\cos(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1)}\right)\end{aligned}\quad (13)$$

1.2 Pohybové rovnice

1.2.1 Matice setrvačnosti

Pro analýzu pohybu tuhého tělesa se využívají dva integrály. Oba integrály využívají geometrické vlastnosti tuhého tělesa. První integrál se používá při translačních pohybech a udává těžiště tuhého tělesa. Druhý integrál se používá při rotačních pohybech a udává moment setrvačnosti. [2]

Matice setrvačnosti se skládá z 3x3 momentů setrvačnosti. Označuje se písmenem I a má tvar: [2]

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}\quad (14)$$

Diagonální momenty setrvačnosti matice se nazývají polární momenty setrvačnosti.

Nediagonální momenty setrvačnosti matice se nazývají deviační momenty. [2]

1.2.2 Huygens-Steinerova věta

Také nazývaná jako věta o paralelních osách. Spočívá v tom, že lze transformovat moment setrvačnosti souřadné soustavy B_1 s těžištěm umístěným s polohovým vektorem ${}^{B_2}r_c$ do souřadné soustavy B_2 , paralelně umístěné se souřadnou soustavou B_1 . To lze provést následně: [2]

$${}^{B_2}I = {}^{B_1}I + m\tilde{r}_c\tilde{r}_c^T = {}^{B_1}I + m \begin{bmatrix} 0 & -z_c & y_c \\ z_c & 0 & -x_c \\ -y_c & x_c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -z_c & y_c \\ z_c & 0 & -x_c \\ -y_c & x_c & 0 \end{bmatrix}^T = \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
&= B_1 I + m \begin{bmatrix} 0 & -z_c & y_c \\ z_c & 0 & -x_c \\ -y_c & x_c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & z_c & -y_c \\ -z_c & 0 & x_c \\ y_c & -x_c & 0 \end{bmatrix} = \\
&B_1 I + m \begin{bmatrix} z_c^2 + y_c^2 & -y_c x_c & -z_c x_c \\ -x_c y_c & x_c^2 + z_c^2 & -z_c y_c \\ -x_c z_c & -y_c z_c & x_c^2 + y_c^2 \end{bmatrix} \quad (16)
\end{aligned}$$

Snahou je umístit souřadnou soustavu Oxyz tak, aby deviační momenty zanikly. Lokální souřadnou soustavu po provedení zmíněných operací nazveme hlavní souřadnou soustavou a její příslušné momenty setrvačnosti jako hlavní momenty setrvačnosti. [2]

Hlavní momenty setrvačnosti se naleznou řešením následující rovnice s neznámou I: [2]

$$\begin{bmatrix} I_{xx} - I & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} - I & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} - I \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

Řešením neznámé I se získají hlavní momenty setrvačnosti: [2]

$$I_1 = I_x$$

$$I_2 = I_y \quad (18)$$

$$I_3 = I_z$$

K nim jsou přidruženy vlastní vektory, které reprezentují hlavní směry. Hlavní soustava souřadnic je tvořena těmito hlavními směry. [2]

S využitím homogenních polohových vektorů lze definovat tzv. matici pseudosetrvačnosti, která má tento tvar: [3]

$$B_{\bar{I}} = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & mx_c \\ I_{yx} & \frac{I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{yz} & my_c \\ I_{zx} & I_{zy} & \frac{I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}}{2} & mz_c \\ mx_c & my_c & mz_c & m \end{bmatrix} \quad (19)$$

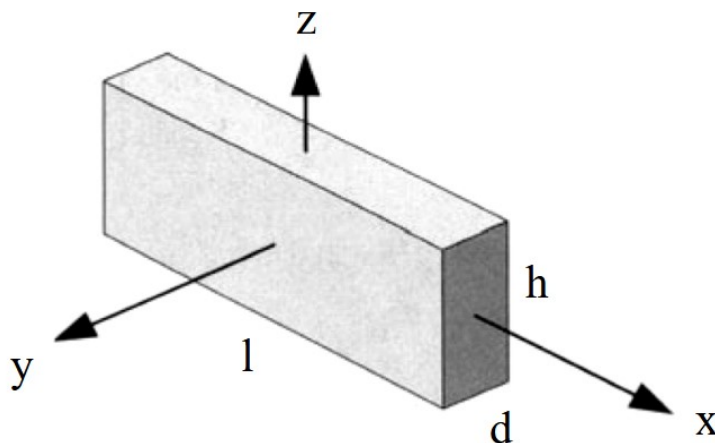
Poloha těžiště tělesa: [3]

$${}^B\vec{r}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} \iiint_B \rho(x, y, z) x \, dx dy dz \\ \frac{1}{m} \iiint_B \rho(x, y, z) y \, dx dy dz \\ \frac{1}{m} \iiint_B \rho(x, y, z) z \, dx dy dz \end{bmatrix} \quad (20)$$

Platí, že tento vektor je nulový pro souřadnou soustavu s počátkem v těžišti.

1.2.3 Moment setrvačnosti tuhého homogenního kvádrového článku

V práci se pro simulační účely používá homogenní kvádrový článek jako náhrada za reálný článek. Tedy je uvažován zjednodušený článek z obrázku (2) s délkou l , šířkou d , výškou h a hmotou m . [3]



Obrázek 2 Tuhý homogenní kvádrový článek [3]

Dle výše zmíněné Huygens-Stainerovy věty je lokální centrální souřadná soustava umístěna do těžiště článku. Tím dojde k vynulování deviačních momentů. Matice setrvačnosti takto zadaného článku je: [3]

$$I = \begin{bmatrix} \frac{m}{12} (d^2 + h^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m}{12} (l^2 + h^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{12} (l^2 + d^2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

1.2.4 Lagrangeova dynamika robotu

K získání dynamických rovnic pohybu robotů se využívají Lagrangeovy pohybové rovnice II. typu, které jsou definovány jako rozdíl kinetické a potenciální energie pohybového systému robotu. Tedy:[2]

$$L = W_k - W_p \quad (22)$$

Písmeno L označuje Lagrangeian nebo-li Lagrangeovu funkci. Použitím Lagrangeovy rovnice pro jednotlivé obecné souřadnice se získají pohybové rovnice robotu. Tedy: [2]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = Q_r \quad (23)$$

Kde q_r značí obecné souřadnice. Pro r platí $r = 1, 2, \dots, n$. Q_r značí nepotenciálovou zobecněnou sílu, která způsobuje změnu q_r .

Pro sériový manipulátor platí tento obecný tvar pohybových rovnic: [3]

$$D(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + \bar{H}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + \bar{G}(\bar{q}) = \bar{Q} \quad (24)$$

1.3 Trajektorie

Obecně obě trajektorie budou muset plnit dvě podmínky. První nutnou podmínkou je, že se trajektorie budou muset nacházet v pracovním prostoru robotu. Druhou podmínkou je, že vzdálenost mezi body nesmí překročit maximální možnou vzdálenost. K tomuto účelu se využijí hodnoty rychlostí v jednotlivých kloubech, které jsou známé z tabulky (1).

Trajektorie se budou nejprve navrhovat v kartézských souřadnicích a následně se pomocí inverzní kinematiky převedou do kloubových souřadnic pomocí rovnic z inverzní kinematické úlohy.[3]

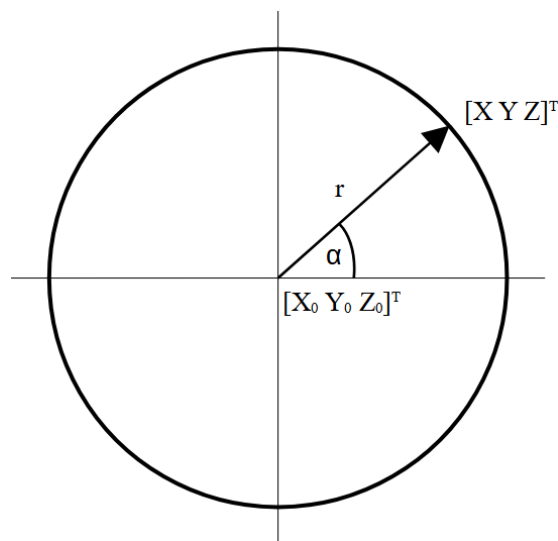
1.3.1 Kruh

Jak z názvu vyplývá, úkolem je vytvořit trajektorii kruhu. Konkrétně takového kruhu, aby se měnily jeho funkční hodnoty všech tří os. K tomuto účelu slouží tyto vztahy: [4]

$$X = X_0 + r \cdot \cos(\alpha) \quad (25)$$

$$Y = Y_0 + r \cdot \sin(\alpha) \quad (26)$$

$$Z = Z_0 + \frac{r}{k} \cdot \cos(\alpha) \quad (27)$$



Obrázek 3 Parametry kruhu

Kde:

X_0, Y_0 a Z_0 – počátek kruhu

r – poloměr kruhu

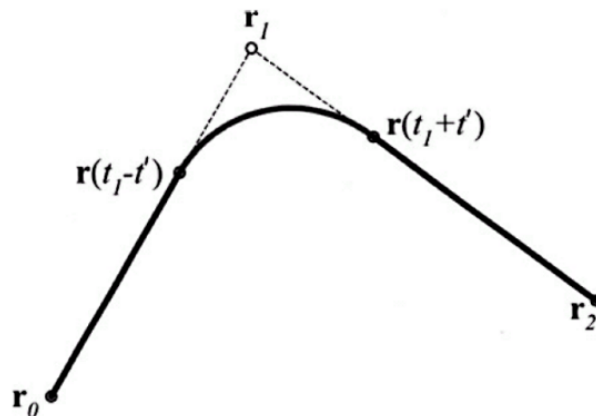
k – dělicí konstanta

1.3.2 Roh

Účelem této trajektorie je proložení pravého úhlu parabolou. Zmíněné proložení je možné libovolně měnit, nebo úplně odstranit. Pro vytvoření této trajektorie jsou využity tyto vztahy:[4]

$$r(t) = r_1 - \frac{t_1-t}{t_1-t_0} [r_1 - r_0] \text{ platí pro } t_0 \leq t \leq t_1 \quad (28)$$

$$r(t) = r_1 + \frac{t-t_1}{t_2-t_1} [r_2 - r_1] \text{ platí pro } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (29)$$



Obrázek 4 Proložení trajektorie rohu parabolou [2]

Kde:

r_0 – polohový vektor prvního bodu, kterým trajektorie prochází

r_1 - polohový vektor přechodového bodu

r_2 - polohový vektor druhého bodu, kterým trajektorie prochází

t_0 – čas započetí trajektorie

t_1 – čas započetí přechodové křivky

t – čas přechodové křivky

t_2 – čas ukončení trajektorie

2 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ DYNAST

Dynast je systém pro simulaci virtuálních experimentů dynamických soustav. Řeší nelineární rovnice zadané v textové formě. Řešený problém lze zadat i pomocí modelu, a v tom případě si Dynast sám vytvoří textovou formou problému. Formulování rovnic problému pro fyzikální modelování systémů je založeno na multipólovém modelování. Taková procedura modelování začíná dekompozicí modelovaného systému do rozdělených subsystémů. Tento subsystémový multipólový model aproximuje interakci energie zmíněného subsystému se zbytkem systému za předpokladu, že interakce nastávají pouze v zapojení mezi jednotlivými subsystémy a energie tekoucí každou sítí může být vyjádřena jako součin dvou komplementárních výkonových proměnných.[6]

Multipólové modelování sebou přináší výhodu zjednodušení výpočtů. Každý jednotlivý submodel charakterizuje dynamické chování jednotlivé části reálného systému. Každý submodel má tolik pólů, kolik vyžaduje dvojic výkonových veličin pro interakci s okolím. Pól je reprezentován úsečkou, která vyčnívá z modelu.[7]

V Dynastu se nachází knihovna již vytvořených submodelů, ale i tak je možné tyto submodely doplnit o další pomocí externí knihovny, nebo si vytvořit vlastní.[6]

Výhodou programu Dynast je, že se může použít pro simulaci servopohonu, při kterém se zkoumá chování při polohování. V této práci se bude využívat hlavně pro porovnání chování reálného zařízení oproti teoretickému chování.[7]

2.1 Blokové schémata

Blok slouží k zápisu matematického vztahu pro vstupní a výstupní proměnné. Spojením značky bloku s jiným submodelem nebo blokem vznikne grafická reprezentace určité soustavy rovnic. Bloky lze spojovat s fyzikálními schématy.[7]

2.1.1 Explicitní blok



Obrázek 5 Explicitní blok[7]

Do tohoto bloku je možné vepsat explicitní rovnici a její funkční hodnota bude výstupní proměnnou. Pokud nebude do bloku zapsána rovnice, ale pouze konstanta, pak se blok bude chovat jako nezávislý zdroj výstupní proměnné.[7]

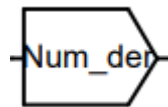
2.1.2 Integrátor



Obrázek 6 Blok integrátoru[7]

Jak z názvu vypovídá, tento blok provádí integraci vstupní proměnné. [7]

2.1.3 Numerická derivace



Obrázek 7 Blok numerické derivace[7]

Blok provádí numerickou derivaci s periodou, která je parametrem tohoto bloku. [7]

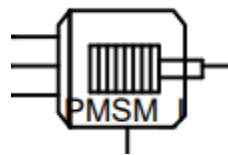
2.1.4 Reference



Obrázek 8 Bloky reference[7]

Tyto bloky se ve schématu používají pro vytvoření reference. V obrázku (6) je vlevo umístěn blok pro uzemnění napětí a vpravo blok pro vztažný rám mechanického systému.[7]

2.1.5 Synchronní stroj s permanentním magnetem



Obrázek 9 Blok synchronního stroje s perm. magnetem[7]

Tento blok reprezentuje PMSM motor. [7]

2.1.6 Rotační tlumič



Obrázek 10 Blok rotačního tlumiče[7]

Tento blok slouží k zavedení tlumení do modelu.[7]

2.1.7 Zdroj průtokové veličiny



Obrázek 11 Blok zdroje průtokové veličiny[7]

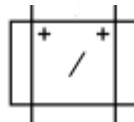
Jak již z názvu vyplývá jedná se o ideální zdroj průtokové veličiny. Tento blok je univerzální a může být využit pro všechny průtokové veličiny. V této práci je použit jako zdroj elektrického proudu. [7]



Obrázek 12 Blok zdroje síly[7]

Opět se jedná o blok průtokové veličiny, ale v tomto případě pouze o mechanický zdroj síly.[7]

2.1.8 Převodovka



Obrázek 13 Blok převodovky[7]

Tento blok slouží k ideálnímu převodu energie. Parametrem je převodový poměr.[7]

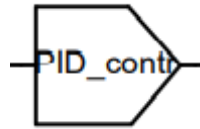
2.1.9 Rozdílový blok



Obrázek 14 Rozdílový blok[7]

Tento blok odečítá vstupní proměnné. Výstupem se stane výsledek odečtení. Rozdílový blok je v práci použit v regulátorech.[7]

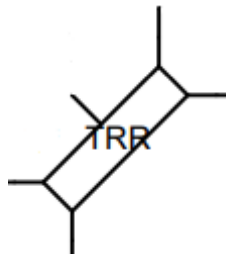
2.1.10 PID regulátor



Obrázek 15 Blok PID regulátoru[7]

Jedná se o blok, který reprezentuje PID regulátor s parametry proporciální složky P, integrační složky I a derivační složky D. Výstupem je hodnota $\pm 10V$. [7]

2.1.11 Tuhý rotační článek



Obrázek 16 Tuhý rotační článek[7]

Blok tuhého rotačního článku má parametry: hmotnost, polohu těžiště, setrvačnost. Další parametry článku jsou souřadnice spojení s dalším článkem v lokální souřadné soustavě.[7]

3 PMSM

Synchronní motory s permanentními magnety jsou nejčastěji užívané motory pro polohové servomechanismy. Rotor synchronního motoru se otáčí synchronně s otáčením točivého magnetického pole statoru. [5]

3.1 Parkova transformace

Jedná se o transformaci ze stojící soustavy souřadnic do soustavy pohybující se danou rychlostí. Jinými slovy se jedná o transformaci všech veličin stejé, která je výkonově invariantní. [5]

Veličiny fází statoru jsou x_x , x_y , x_z a transformované veličiny statoru x_d , x_q a 0. Transformace je dána těmito rovnicemi: [5]

$$x_d = k_d \left(x_x \cos(\vartheta) + x_y \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + x_z \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (30)$$

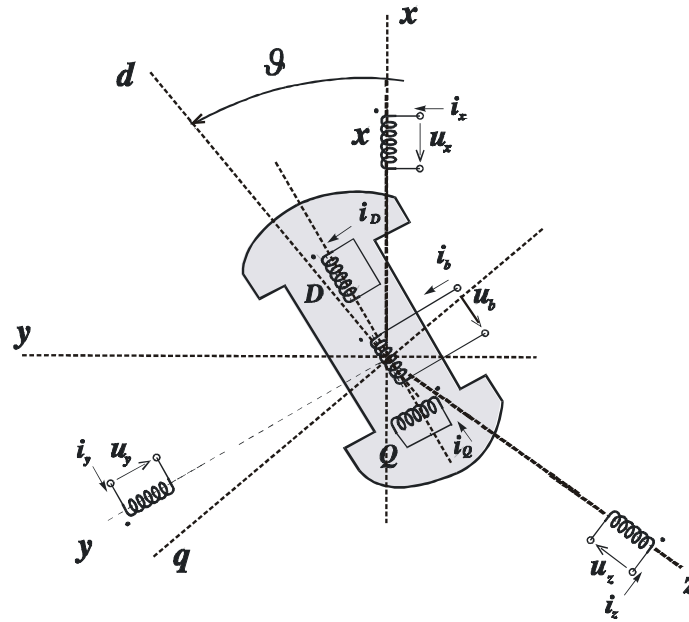
$$x_q = -k_q \left(x_x \sin(\vartheta) + x_y \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + x_z \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (31)$$

$$x_0 = k_0 (x_x + x_y + x_z) \quad (32)$$

Maticově:

$$T(\varphi(t)) = \begin{bmatrix} k_d \cos(\vartheta) & k_d \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & k_d \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -k_q \sin(\vartheta) & -k_q \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & -k_q \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ k_0 & k_0 & k_0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Fyzikálně si veličinu x_d lze představit jako průmět velikostí okamžitých veličin x_x , x_y , x_z do osy d, která se otáčí rychlostí rotoru. Průmětem velikostí okamžitých veličin x_x , x_y , x_z je veličina x_q , která je natočena o $\pi/2$ ve směru otáčení rotoru. Navíc se otáčí stejnou rychlostí. Znaménko minus, které se vyskytuje na druhém řádku transformační, matice odpovídá ose q, která předbíhá ve smyslu točení o $\pi/2$ osu d. [5]



Obrázek 17 Základní uspořádání třífázového stroje s vyniklými póly[5]

Chceme-li popisovat chování soustavy z pohledu rotoru, pak je nutné provést inverzní transformaci. Tedy: [5]

$$\begin{bmatrix} k_d \cos(\vartheta) & k_d \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & k_d \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -k_q \sin(\vartheta) & -k_q \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & -k_q \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ k_0 & k_0 & k_0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos(\vartheta) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin(\vartheta) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Aby byla splněna podmínka výkonové invariantnosti, pak musí platit: [5]

$$\{T(\varphi(t))\}^{-1} = \{T(\varphi(t))\}^T \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos(\vartheta) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_0} \sin(\vartheta) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \\ \frac{2}{3} \frac{1}{k_d} \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{2}{3} \frac{1}{k_q} \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{3} \frac{1}{k_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_d \cos(\vartheta) & -k_q \sin(\vartheta) & k_0 \\ k_d \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & -k_q \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) & k_0 \\ k_d \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) & -k_q \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) & k_0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Podmínka invariantnosti, která z těchto vztahů plyne, je: [5]

$$k_d^2 = k_q^2 = \frac{2}{3}; k_0^2 = \frac{1}{3} \quad (37)$$

$$k_d = k_q = \sqrt{\frac{2}{3}}; k_0 = \sqrt{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

3.2 Model PMSM

Vztahy pro výpočet elektromagnetických jevů: [5]

$$u_d(t) = R i_d(t) + L_d \frac{d i_d(t)}{dt} - \underbrace{p_p \frac{\Psi_q(t)}{L_q i_q(t)}}_{n_d(t)} \omega(t) \quad (39)$$

$$u_q(t) = R i_q(t) + L_q \frac{d i_q(t)}{dt} - \underbrace{p_p \left(\frac{\Psi_d(t)}{L_d i_d(t) + k_n} \right)}_{n_q(t)} \omega(t) \quad (40)$$

$$m_i(t) = \underbrace{p_p \left(\frac{\Psi_d(t)}{L_d i_d(t) + k_n} \right)}_{n_q(t)} i_q(t) - \underbrace{p_p \frac{\Psi_q(t)}{L_q i_q(t)}}_{n_d(t)} i_d(t) \quad (41)$$

Je známo, že mezi veličinami v dvojrozměrném ortogonálním souřadném systému a Gaussovou rovinou komplexních čísel, je jedno jednoznačné zobrazení. Toto se aplikuje na PMSM tímto způsobem: [5]

$$\vec{U}_s(t) = u_d(t) + i u_q(t); i^2 = -1 \quad (42)$$

$$\vec{I}_s(t) = i_d(t) + i i_q(t); i^2 = -1 \quad (43)$$

$$\vec{\psi}_s(t) = L_d i_d(t) + k_n + i L_q i_q(t); i^2 = -1 \quad (44)$$

Vynásobením druhé rovnice popisující PMSM imaginární jednotkou i se získá: [5]

$$R i i_q(t) + L_q \frac{d(i i_q(t))}{dt} + p_p i (L_d i_d(t) + k_n) \omega(t) = i u_q(t) \quad (45)$$

$$R i_q(t) + L_q \frac{d(i_q(t))}{dt} + p_p \overbrace{\left(\frac{\psi_d(t)}{L_d i_d(t) + k_n} \right)}^{n_q(t)} \omega(t) = u_q(t) \quad (46)$$

Získaná rovnice se přičte k první rovnici: [5]

$$R i_d(t) + L_d \frac{d(i_d(t))}{dt} - p_p \overbrace{\left(\frac{\psi_q(t)}{L_q i_q(t) + k_n} \right)}^{n_d(t)} \omega(t) = u_d(t) \quad (47)$$

Z toho se získá: [5]

$$R \left(\overbrace{i_d(t) + i i_q(t)}^{\vec{i}_s(t)} \right) + \frac{d}{dt} \left(\overbrace{L_d i_d(t) + k_n + i L_q i_q(t)}^{\vec{\psi}_s(t)} \right) + p_p \left(i \psi_d(t) - \psi_q(t) \right) \omega(t) = \overbrace{u_d(t) + i u_q(t)}^{\vec{u}_s(t)} \quad (48)$$

Vznikne úprava: [5]

$$R \vec{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s(t) + i p_p \left(\psi_d(t) - i \psi_q(t) \right) \omega(t) = \vec{u}_s(t) \quad (49)$$

Tedy ze dvou rovnic v reálné proměnné se získá jedna rovnice v komplexní proměnné.

Pro vnitřní moment pak platí: [5]

$$m_i(t) = p_p \left(\overbrace{\frac{\psi_d(t)}{L_d i_d(t) + k_n}} \right) i_q(t) - p_p \overbrace{\frac{\psi_q(t)}{L_q i_q(t)}} i_d(t) \quad (50)$$

Pokud reálná osa Gaussovy souřadné soustavy se otáčí rychlostí ω_e a je spojena s vektorem toku statoru, pak každém okamžiku platí: [5]

$$\vec{\psi}_s(t) = \text{Re}\{\vec{\psi}_s(t)\} = \psi_d(t) \quad (51)$$

Dále platí následující rovnice: [5]

$$R\vec{i}_s(t) + \frac{d}{dt}\vec{\Psi}_s(t) + ip_p\vec{\Psi}_s(t)\omega(t) = \vec{u}_s(t) \quad (52)$$

Rovnice (52) se upraví: [5]

$$R\vec{i}_s(t) + \frac{d}{dt}\vec{\Psi}_d(t) + ip_p\vec{\Psi}_d(t)\omega(t) = \vec{u}_s(t) \quad (53)$$

Porovnáním imaginárních a reálných částí se dostane: [5]

$$Ri_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} = u_d(t) \quad (54)$$

$$Ri_q(t) + p_p(L_d i_d(t) + k_n)\omega(t) = u_q(t) \quad (55)$$

$$m_i(t) = -p_p i_q(t)(L_d i_d(t) + k_n) \quad (56)$$

Při takto zvolené orientaci souřadné soustavy je část proudu tvořící magnetický tok tvořena pouze proudem $i_d(t)$. Řiditelný moment stroje je tvořen součinem tokotvorného proudu $i_d(t)$ a momentotvorného proudu $i_q(t)$. [5]

Ze základní pohybové rovnice stejnosměrného elektrického stroje s mechanickým komutátorem vystupuje vnitřní mechanický kroutící moment: [5]

$$m_i(t) = \frac{p_p N_v}{a\pi} L_{bk} i_b(t) i_k(t) \quad (57)$$

Kde $i_b(t)$ je elektrický proud v budícím vynutí stroje. Platí pro něj:

$$\frac{u_b(t)}{R_b} = \tau_b \frac{di_b(t)}{dt} i_b(t) \quad (58)$$

Kde $u_b(t)$ je elektrické napětí na budících svorkách stroje.

Dále $i_k(t)$ je elektrický proud ve vinutí rotoru stroje. Platí pro něj:

$$\frac{u_k(t)}{R_k} = \tau_k \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{p_p N_v}{R_k a \pi} \omega(t) + i_k(t) \quad (59)$$

Kde $u_k(t)$ je elektrické napětí na svorkách rotoru stroje.

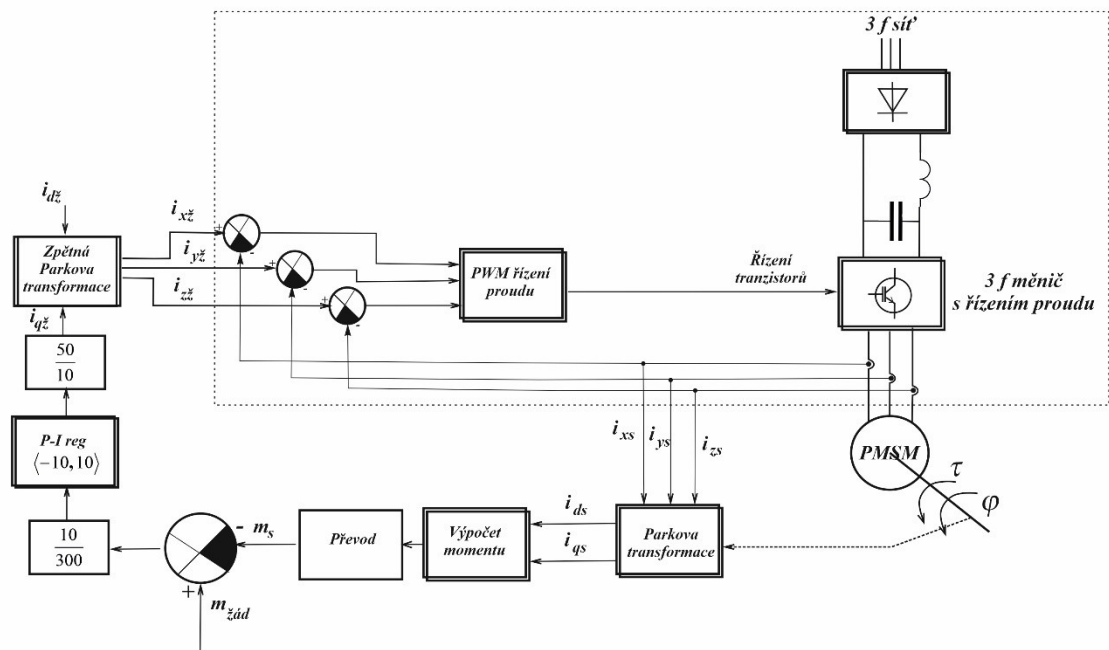
Označení $\omega(t)$ je vzájemná úhlová rychlost rotoru vzhledem k statoru.

Zapojením výkonového elektrického systému lze s pomocí různého typu kvantování vstupní elektrické energie vytvořené spínáním jednotlivých tranzistorů dosáhnout řízení obou dvou proudů $i_b(t)$ a $i_k(t)$ podle rovnice (57). [5]

V základní pohybové rovnici PMSM stroje vystupuje vnitřní kroutící moment: [5]

$$m_i(t) = p_p i_q(t)(L_d i_d(t) + k_n) \quad (60)$$

Kde $i_d(t)$ je elektrický proud vytvářející magnetický tok stroje, $i_q(t)$ je elektrický proud ve vinutí rotoru stroje a $\omega(t)$ je elektrická rychlost otáčení fázoru statorového magnetického toku.[5]



Obrázek 18 Schéma zapojení PMSM stroje pro řízení momentu[5]

Na obrázku (18) se nachází schéma řízení momentu motoru PMSM. Ve schéma řízení momentu PMSM motoru na obrázku(18) je úhel rotoru snímán snímačem úhlu tzv. resolverem. Následně lze vidět provedení Parkovy transformace a přivedení i_r , tedy žádané hodnoty amplitudy proudu mezi jednotlivými fázemi. Následně jsou žádané proudy i_{z1} a i_{z2} přivedeny na PWM měnič, který generuje proudy do motoru. [5]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

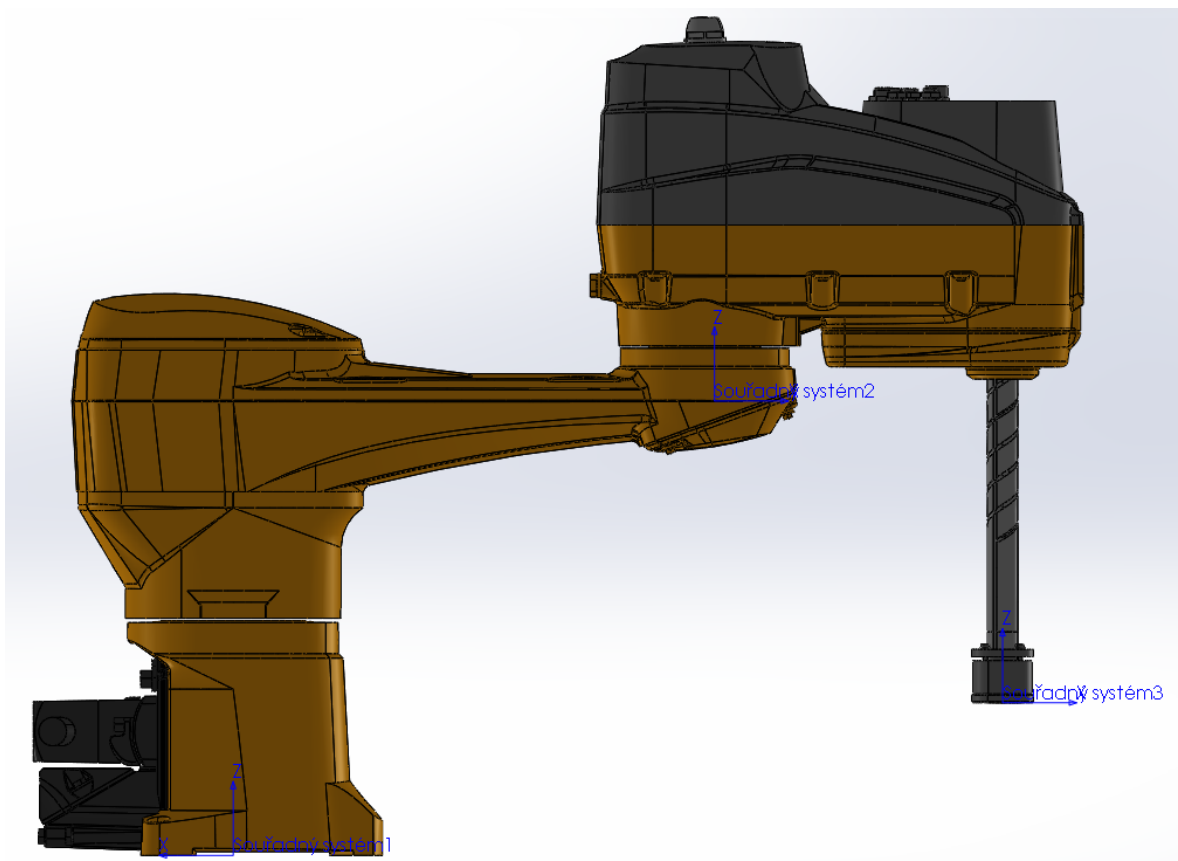
4 POHYBOVÉ ROVNICE

Zavedené souřadné soustavy jsou již známé z teoretické části týkající se kinematiky. Rovněž jsou známy transformační matice. Vzhledem k simulačnímu modelu budou při výpočtu pohybových rovnic uvažovány pouze první dva klouby. Bude se tedy pracovat s těmito transformačními maticemi:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi_1) & \sin(\varphi_1) & 0 & -l_1 \cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1) & -\cos(\varphi_1) & 0 & -l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi_1 - \varphi_2) & \sin(\varphi_1 - \varphi_2) & 0 & -l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \cos(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1 - \varphi_2) & -\cos(\varphi_1 - \varphi_2) & 0 & -l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \sin(\varphi_1) \\ 0 & 0 & 1 & h_1 - h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Následně se zavedou souřadné soustavy do 3D modelu robotu se systému SolidWorks. [8]



Obrázek 19 Zavedené souřadné soustavy do 3D modelu[8] v systému SolidWorks
Jsou-li zavedeny souřadné soustavy do 3D modelu, pak s využitím nástroje „fyzikální vlastnosti“ systému SolidWorks se získají matice setrvačnosti.

Pro první článek je známo:

$$\vec{r}_1 = \begin{bmatrix} -0,3279 \\ 0,0000 \\ -0,0333 \\ 1,0000 \end{bmatrix} \text{ [m]} \quad (63)$$

$$m_1 = 11,0734 \text{ [kg]} \quad (64)$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0,0604 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2489 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2652 \end{bmatrix} \text{ [kgm}^2\text{]} \quad (65)$$

Pro druhý článek je známo:

$$\vec{r}_2 = \begin{bmatrix} -0,1530 \\ 0,0015 \\ 0,3923 \\ 1,0000 \end{bmatrix} \text{ [m]} \quad (66)$$

$$m_2 = 10,9154 \text{ [kg]} \quad (67)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0,0643 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0140 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1682 \end{bmatrix} \text{ [kgm}^2\text{]} \quad (68)$$

Ze známého vztahu pro matici pseudo-setrvačnosti z rovnice (19) se vypočítají jednotlivé matice pseudo-setrvačnosti.

Z matic pseudo-setrvačnosti se vypočítá symetrická matice setrvačnosti:

$$D_{ij} = \sum_{r=\max(i,j)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial {}^0T_r}{\partial q_j} {}^r\bar{I}_r \frac{\partial {}^0T_r^T}{\partial q_i} \right) \quad (69)$$

$$D = \begin{bmatrix} \text{tr} \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_1 \right) \bar{I}_1 \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_1 \right)^T + \text{tr} \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_2 \right) \bar{I}_2 \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_2 \right)^T & \text{tr} \left(\frac{d}{d\varphi_2} {}^0T_2 \right) \bar{I}_2 \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_2 \right)^T \\ \text{tr} \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_2 \right) \bar{I}_2 \left(\frac{d}{d\varphi_1} {}^0T_2 \right)^T & \text{tr} \left(\frac{d}{d\varphi_2} {}^0T_2 \right) \bar{I}_2 \left(\frac{d}{d\varphi_2} {}^0T_2 \right)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (70)$$

Vektor vazeb rychlosti:

$$H_{ijk} = \sum_{r=\max(i,j,k)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial {}^2 {}^0T_r}{\partial q_j \partial q_k} {}^r\bar{I}_r \frac{\partial {}^0T_r^T}{\partial q_i} \right) \quad (71)$$

Vyjádření jednotlivých složek vektoru vazeb rychlosti:

$$H_{111} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_1}{\partial \varphi_1 \partial \varphi_1} \bar{I}_1 \frac{\partial {}^0T_1^T}{\partial \varphi_1} \right) + \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_1 \partial \varphi_1} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_1} \right) \quad (72)$$

$$H_{112} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_1 \partial \varphi_2} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_1} \right) \quad (73)$$

$$H_{121} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_2 \partial \varphi_1} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_1} \right) \quad (74)$$

$$H_{122} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_2 \partial \varphi_2} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_1} \right) \quad (75)$$

$$H_{211} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_1 \partial \varphi_1} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_2} \right) \quad (76)$$

$$H_{212} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_1 \partial \varphi_2} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_2} \right) \quad (77)$$

$$H_{221} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_2 \partial \varphi_1} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_2} \right) \quad (78)$$

$$H_{222} = \text{tr} \left(\frac{\partial^2 {}^0T_2}{\partial \varphi_2 \partial \varphi_2} \bar{I}_2 \frac{\partial {}^0T_2^T}{\partial \varphi_2} \right) \quad (79)$$

$$H_1 = \dot{\varphi}_1^2 H_{111} + \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 H_{112} + \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_1 H_{121} + \dot{\varphi}_2^2 H_{122} \quad (80)$$

$$H_2 = \dot{\varphi}_1^2 H_{211} + \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 H_{212} + \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_1 H_{221} + \dot{\varphi}_2^2 H_{222} \quad (81)$$

$$H = [H_1, H_2]^T \quad (82)$$

Vektor gravitační síly:

$$G_i = - \sum_{r=i}^n m_r g^T \frac{\partial {}^0T_r}{\partial q_i} r_r \quad (83)$$

$$G = \begin{bmatrix} -m_1[0,0,-g,0] \left(\frac{d}{d\varphi_1} T1 \right) r_1 - m_2[0,0,-g,0] \left(\frac{d}{d\varphi_1} T2 \right) r_2 \\ -m_2[0,0,-g,0] \left(\frac{d}{d\varphi_2} T2 \right) r_2 \end{bmatrix} \quad (84)$$

Nakonec se již mohou vypočítat pohybové rovnice.

První pohybová rovnice:

$$Q_1 = D_{11}\ddot{\varphi}_1 + D_{12}\ddot{\varphi}_2 + H_1 + G_1 \quad (85)$$

$$Q_1 = \ddot{\varphi}_1 \left(\overbrace{\frac{K_1}{l_1 l_2 m_2} \cos(\varphi_2)}^{K_1} + \overbrace{\frac{m_1}{12} (d_1^2 + d_2^2 + l_1^2 + l_2^2) + l_1^2 m_2}^{K_2} \right) - \ddot{\varphi}_2 \left(\overbrace{\frac{m_1}{12} (d_2^2 + l_2^2)}^{K_3} + \frac{1}{2} \overbrace{\frac{K_1}{l_1 l_2 m_2} \cos(\varphi_2)}^{K_1} \right) - \frac{1}{2} \dot{\varphi}_2 \overbrace{\frac{K_1}{l_1 l_2 m_2} \sin(\varphi_2)}^{K_1} (2 \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) \quad (86)$$

Druhá pohybová rovnice:

$$Q_2 = D_{21}\ddot{\varphi}_1 + D_{22}\ddot{\varphi}_2 + H_2 + G_2 \quad (87)$$

$$Q_2 = \ddot{\varphi}_1 \left(\overbrace{\frac{m_1}{12} (d_2^2 + l_2^2)}^{K_4} + \overbrace{m_2 l_1^2 + \frac{K_1}{l_1 l_2 m_2} \cos(\varphi_2)}^{K_1} \right) + \ddot{\varphi}_2 \overbrace{\frac{m_1}{12} (d_2^2 + l_2^2)}^{K_3} + \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 \overbrace{\frac{K_1}{l_1 l_2 m_2} \sin(\varphi_2)}^{K_1} \quad (88)$$

Takto získané pohybové rovnice se upraví do následujícího tvaru:

$$\begin{bmatrix} \overbrace{K_1 \cos(\varphi_2) + K_2}^A & \overbrace{K_1 \cos(\varphi_2) + K_4}^B \\ \frac{1}{2} \overbrace{K_1 \cos(\varphi_2) + K_3} & K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overbrace{Q_1 - \frac{1}{2} \dot{\varphi}_2 K_1 (2 \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) \sin(\varphi_2)}^B \\ Q_2 + \frac{1}{2} \dot{\varphi}_1^2 K_1 \sin(\varphi_2) \end{bmatrix} \quad (89)$$

Nakonec úprava na následující tvar:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(A)} A^{-1} B \quad (90)$$

Uvedené rovnice lze využít při návrhu řízení, kdy se robot bere jako celek. K výpočtu pohybových rovnic byl využit skript z přílohy (PIII).

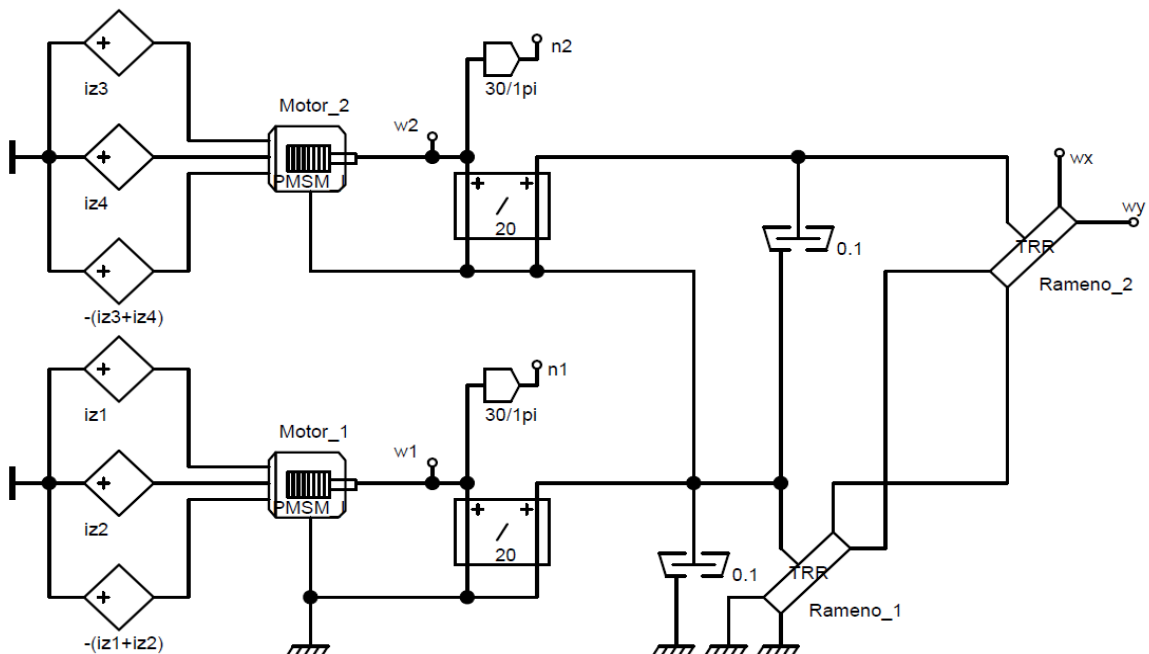
Nicméně, jak bylo zmíněno v teoretické části, Dynast využívá multi-portového modelování. Vzhledem k tomu simulační model nepoužívá vypočítané pohybové rovnice a vytváří si je sám.

5 SIMULAČNÍ MODEL

5.1 Schéma zapojení

Z dostupné dokumentace robotu TS2 60 nelze zjistit informace o převodovkách a motorech. Za účelem získání těchto informací byl kontaktován výrobce. Tyto informace jím pro tuto práci nebyly poskytnuty. Vzhledem k absenci informací o motorech, převodových poměrech a dalších informacích o robotu TS2 60 byly jednotlivé parametry odhadnuty.

Na obrázku se nachází dva paralelní rotační klouby a dva články. Akčním členem pohánějícím kloub je PMSM motor s ideální převodovkou, která má převodový poměr 20:1. Model je tedy dvouosý R||R robot. Třetí osa robotu TS2 60 je translační a používá kuličkový šroub s velkým převodovým poměrem, který způsobuje samosvorné chování kloubu. V takovém kloubu se pro zkoumané typové trajektorie dynamika neprojeví. Poslední čtvrtý kloub je na robotu z energetických důvodů a také není předmětem této práce. Z toho důvodu byly v simulačním modelu na obrázku (20) zanedbány.



Obrázek 20 Simulační model

Parametry pro Motor_1 a Motor_2 jsou uvedeny v tabulce (3). Parametry článků s názvy Rameno_1 a Rameno_2 jsou v tabulkách (4) a (5).

Parametry motoru č. 1 a motoru č. 2 jsou totožné:

Tabulka 3 Parametry PMSM motorů

I _d	IdzX [A]	Jms	10e-3 [kgm ²]
Ls	0,0014 [H]	Ibb	0,0200 [A]
Lq	0,0014 [H]	Pp	10 [-]
Jmr	0,0002 [kgm ²]	Period	0,0005 [s]

Parametry článku č.1 (Rameno_1):

Tabulka 4 Parametry článku č. 1

M	11,0734 [kg]	XB	0,1900 [m]
XA	-0,1900 [m]	YB	0,0000 [m]
YA	0,0000 [m]	Acc	0,0000 [ms ⁻²]
JJ	$\frac{1}{12} \cdot 11,0734 \cdot 0,3800^2$ [kgm ²]		

Parametry článku č.2 (Rameno_2):

Tabulka 5 Parametry článku č. 2

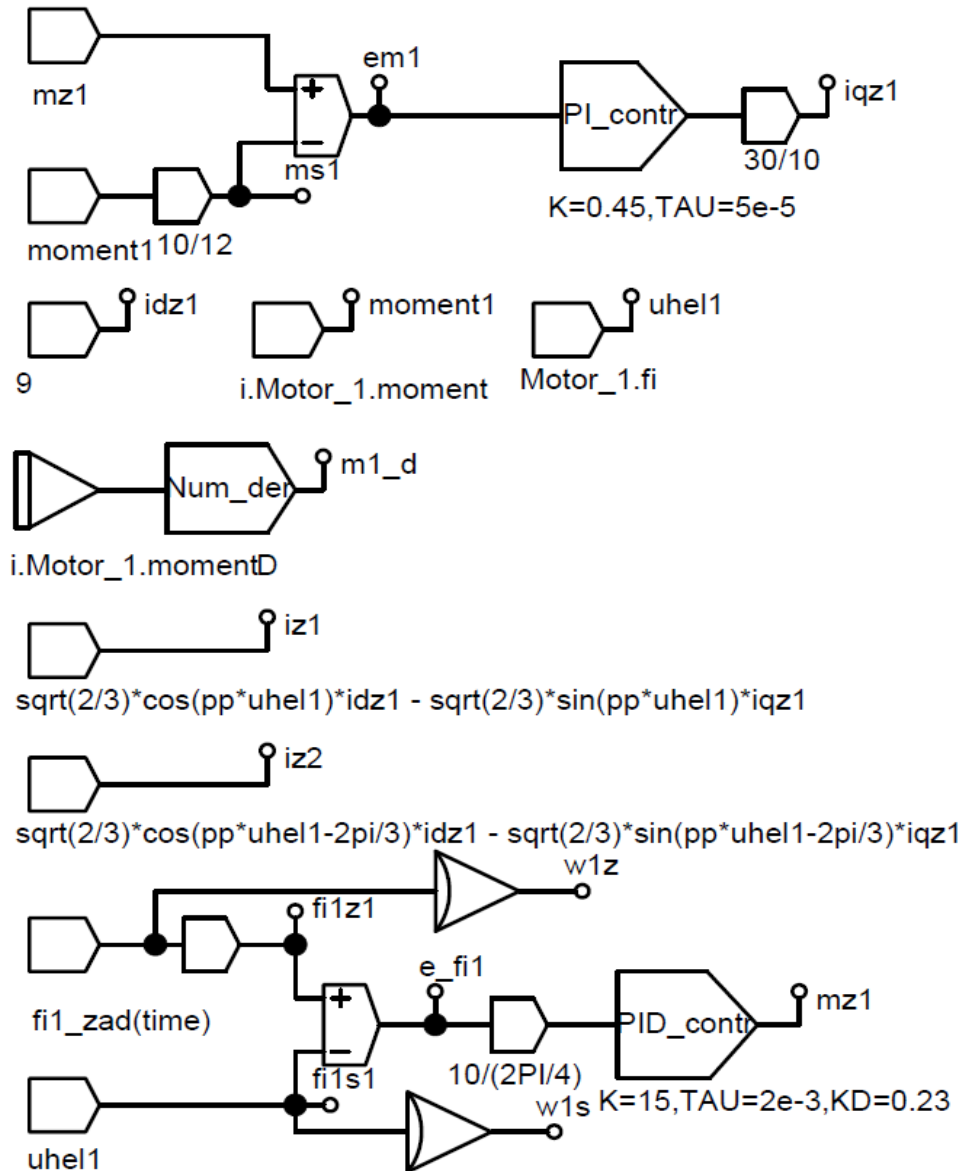
M	10,7734 [kg]	XB	0,1200 [m]
XA	-0,1200 [m]	YB	0,0000 [m]
YA	0,0000 [m]	Acc	0,0000 [ms ⁻²]
JJ	$\frac{1}{12} \cdot 10,7734 \cdot 0,2400^2$ [kgm ²]		

Pozn. v tabulkách parametrů článků je záměrně moment setrvačnosti rozepsán. Důvod je uveden v kapitole teoretické části „Moment setrvačnosti tuhého homogenního kvádrového článku“.

5.2 Nastavení regulátorů

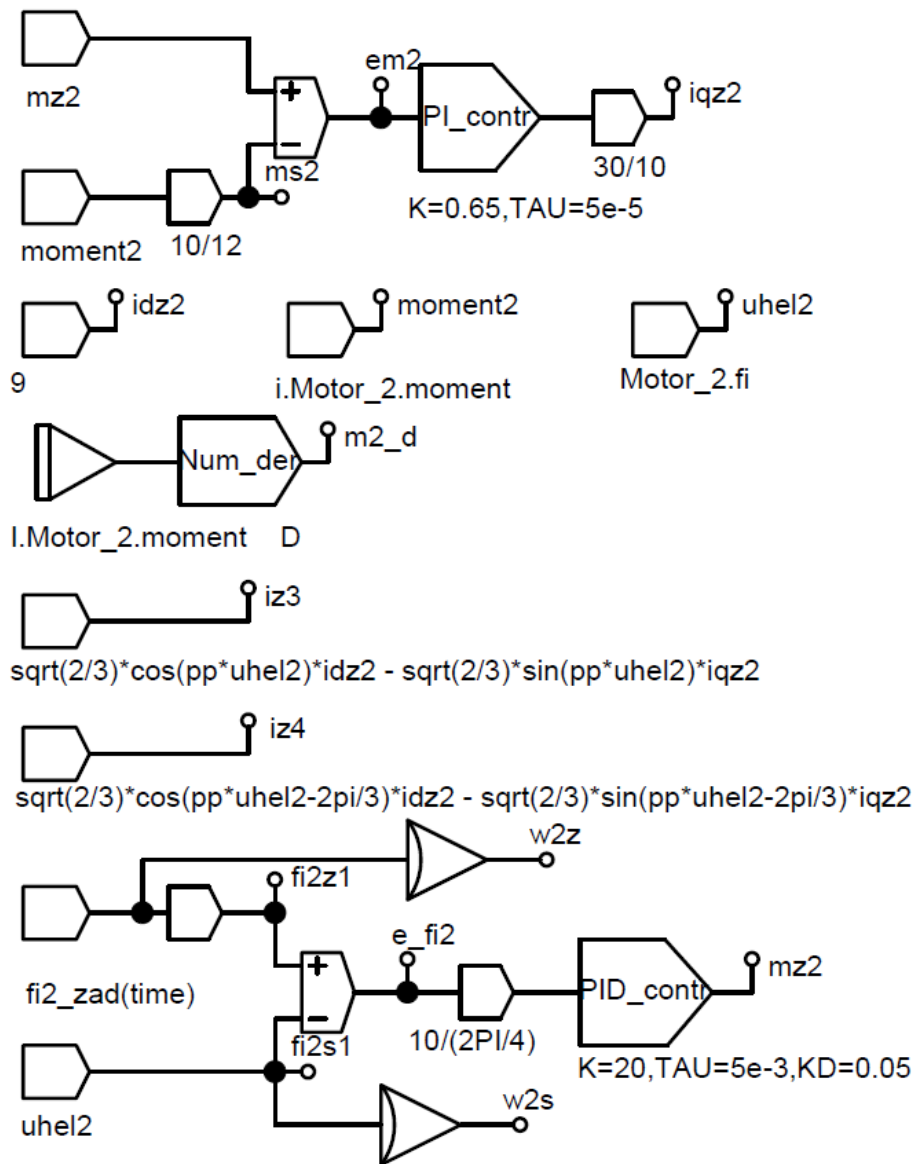
Pro počáteční odhad parametrů regulátorů byla použita metoda Ziegler-Nichols a následně byly parametry upraveny ručně.

Následující obrázky (21) a (22) plní stejnou funkci, a proto mají stejnou strukturu. Rozdíl je v nastavení regulátorů. Pro momentové smyčky byl použit regulátor PI a pro polohovou smyčku regulátor PID.



Obrázek 21 Regulace prvního motoru Motor_1

Na obrázku (21) se v horní části nachází momentová smyčka, na kterou je připojena polohová smyčka ve spodní části obrázku. V prostřední části obrázku se měří moment a úhel natočení PMSM motoru. Vyskytují se zde i bloky, které obsahují rovnice pro výpočet inverzní Parkovy transformace. Jak již bylo uvedeno stejný princip je použit pro regulaci druhého motoru viz obrázek (22). Z uvedených regulačních schémat je možné získat průběhy žádaného momentu, žádané polohy, žádané rychlosti, snímaného momentu, snímané polohy a snímané rychlosti. Rychlosti jsou vypočítány pomocí derivace polohy.



Obrázek 22 Regulace druhého motoru Motor_2

Zvolené parametry regulátorů jsou:

Tabulka 6 Parametry regulátorů

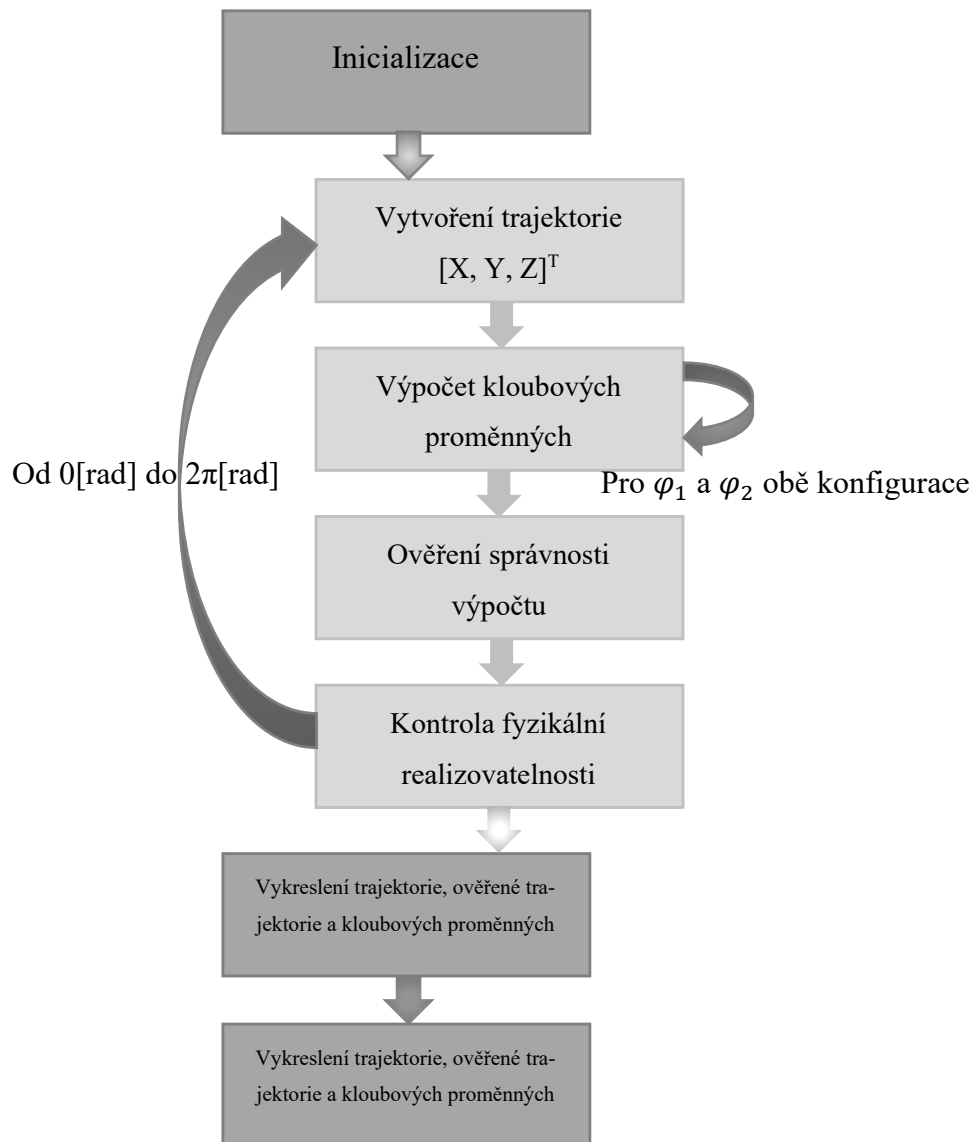
Složka regulátoru	První motor		Druhý motor	
	Momentová smyčka	Polohová smyčka	Momentová smyčka	Polohová smyčka
P	0,4500	15,0000	0,6500	20,0000
I	0,0001	0,0020	0,0001	0,0050
D	-	0,2000	-	0,0500

5.3 Generování typové trajektorie

Z teoretické části v kapitole 1.3 byly uvedeny rovnice kruhu (25),(26),(27) a rohu (28),(29), které se nyní využijí pro vytvoření trajektorie. Parametry, které budou trajektorii určovat vyplývají z uvedených rovnic. V případě kruhu se bude jednat o střed kruhu, poloměr, dělicí

konstantu pro osu Z a úhel, který bude 2π . Pro roh to jsou tři body, které definují, kde se roh nachází. Dalšími parametry jsou dva body, které určují místo počátku a konce proložení. Nakonec časové parametry, které udávají čas proložení rohu.

Pro generování těchto trajektorií byl využit systém Matlab. Výsledkem jsou dva skripty, které po spuštění vytvoří soubor obsahující žádané kloubové proměnné pro typovou trajektorii. Vytvořený soubor se načte v předem vytvořeném programu v LabView nesoucí název „UlohyUTB“, z kterého je možné tyto žádané kloubové proměnné nahrát do robotu TS2 60. Činnost skriptů pro generování žádaných kloubových proměnných je znázorněna na obrázku (23). Skripty jsou k nalezení v příloze (P I) a (P II).



Obrázek 23 Vývojový diagram funkce skriptů pro generování trajektorie

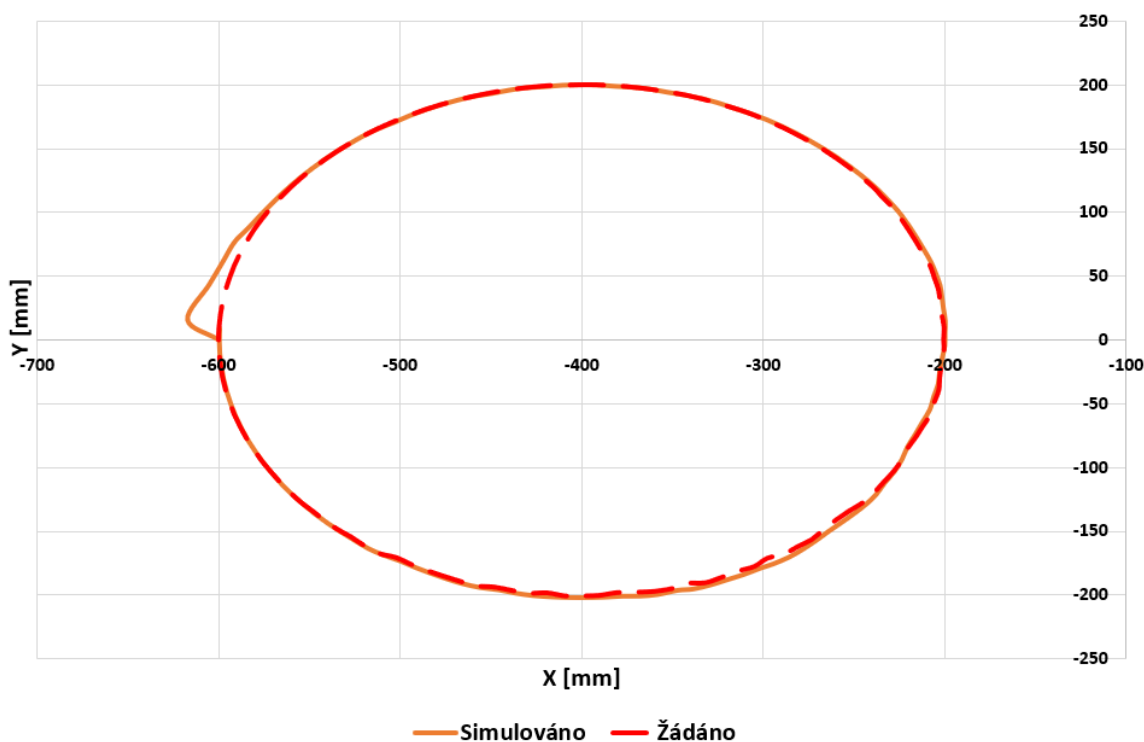
5.4 Výsledky simulace

V závislosti na tom, jaká trajektorie se má vykonat, se zvolí daný skript. Ten vytvoří žádané kloubové proměnné, které se nakopírují do Dynastu. Následně je nutné upravit počáteční polohu koncového efektoru a správně nastavit čas simulace včetně počtu výsledků. Všechny simulace začínají v jiném čase než v čase 0, a to je z důvodu pozdějšího porovnání simulace a reálného měření.

Vyhodnocení přesnosti pohybu bylo realizováno pomocí Eukleidovské vzdálenosti. Tedy podle vzorce:

$$d(k) = \sqrt{(x_{\text{žad}}(k) - x_{\text{změr}}(k))^2 + (y_{\text{žad}}(k) - y_{\text{změr}}(k))^2 + (z_{\text{žad}}(k) - z_{\text{změr}}(k))^2} \quad (91)$$

5.4.1 Kruh



Obrázek 24 Výsledek simulace kruhu

Pro simulaci kruhu byl použit skript z přílohy (P I) a tyto parametry:

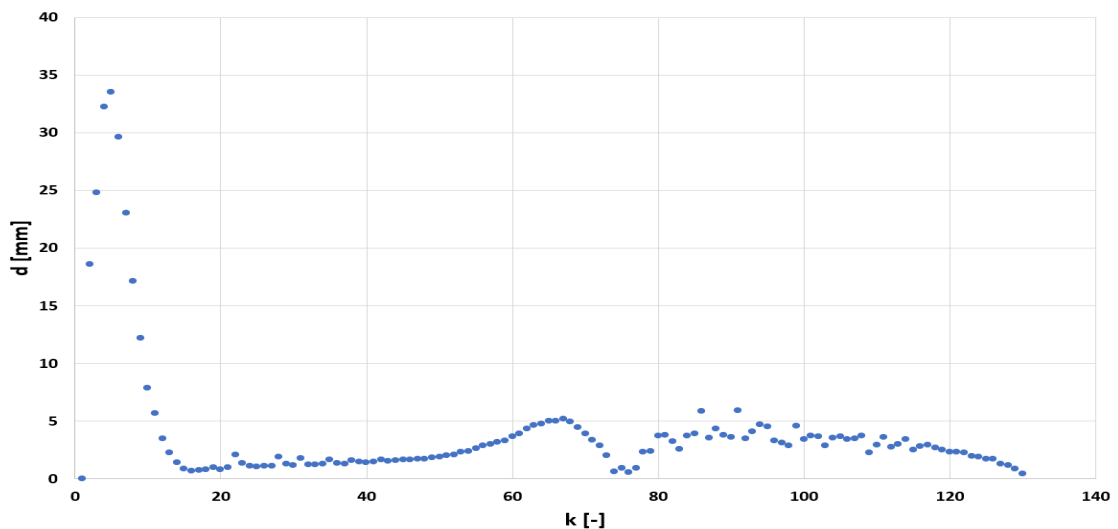
$$PBK = 129 [-], rK = 200 [\text{mm}], PK = [-400 \ 0 \ 140]$$

Na obrázku (24) se nachází výsledek simulace kruhu. Nelze si nevšimnout odchylky od žádaného kruhu. K této odchylce došlo na začátku regulace a je způsobena nastavením

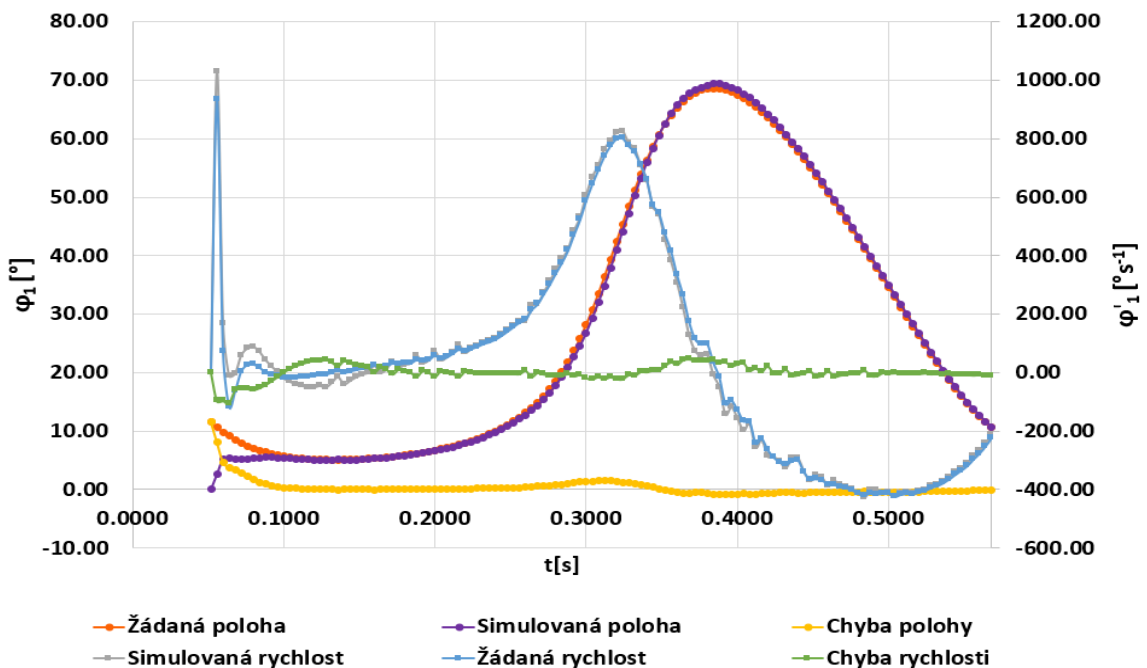
regulátorů. Jak již bylo zmíněno u simulačního modelu, jedná se pouze o odhad, a tedy i tato simulace je pouze přiblížením toho, jakého výsledku se dosáhne při reálném měření.

Počátečním bodem simulace byl bod s hodnotou -600 na ose X a hodnotou 0 na ose Y. Použité žádané kloubové proměnné se shodují s těmi, které byly použity pro reálné měření.

Na obrázku (25) se nachází eukleidovská vzdálenost simulovaného kruhu od žádaného kruhu. Tento graf je vyjádřením velikosti rozdílu mezi žádaným a simulovaným kruhem. Je zde jasně pozorovatelná velikost odchylky z obrázku (24), která byla nejvíce významná.

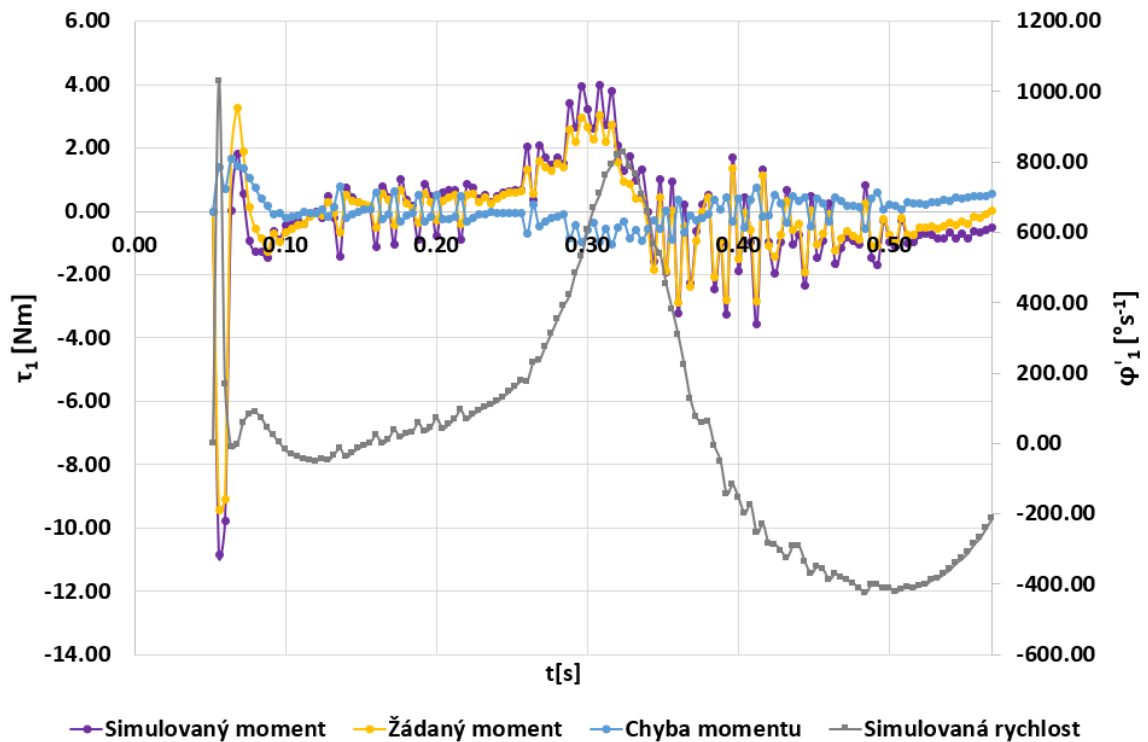


Obrázek 25 Eukleidovská vzdálenost simulovaného kruhu od žádaného kruhu



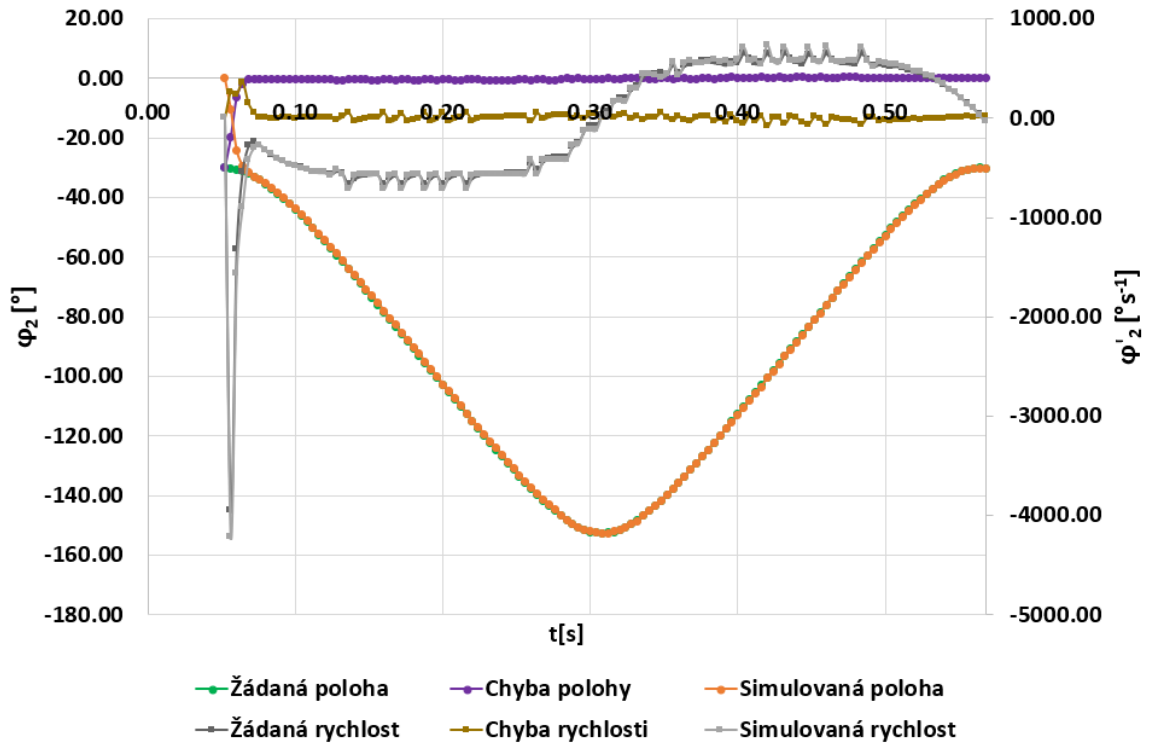
Obrázek 26 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při simulaci kruhu

Obrázek (26) obsahuje průběh úhlu natočení prvního kloubu. Opět si nelze nevšimnou odchylky. Co je nevíce zajímavé na tomto grafu je chování rychlosti. Vzhledem k velké odchylce polohy se regulátor snaží dostat zpět na žádanou polohu. Vlivem toho dojde k velkému zvýšení rychlosti kloubu. Rychlost, která byla nasimulována neodpovídá tabulce (1)! Nicméně díky tomu se simulační robot vrátí rychleji na žádanou trajektorii.

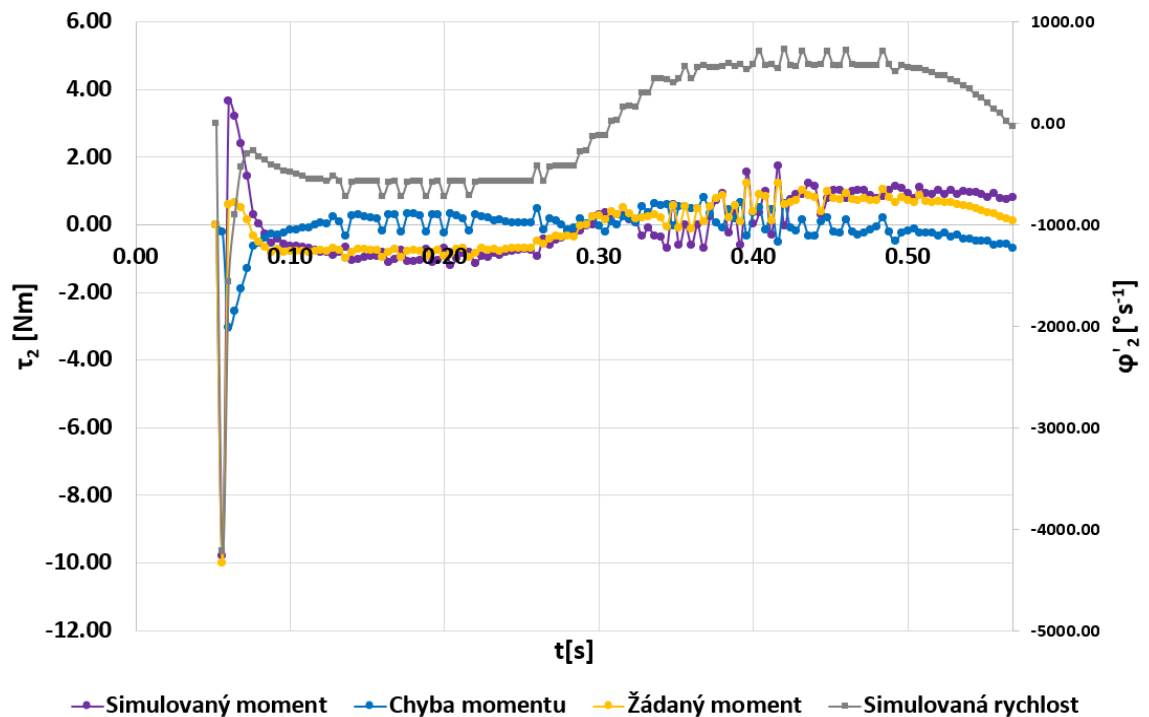


Obrázek 27 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při simulaci kruhu

Obrázek (27) doplňuje průběh momentu prvního kloubu. Stejně jako v předchozím grafu na obrázku (26) se zvýšila rychlost i zde a rychle se zvětšil moment. Další nárůst momentu a rychlosti nastal v půlce trajektorie kruhu, protože bylo nutné se vracet zpět do počátečního bodu, byť druhou půlkou kruhu. V tomto místě se robot nachází blízko základny.


 Obrázek 28 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při simulaci kruhu

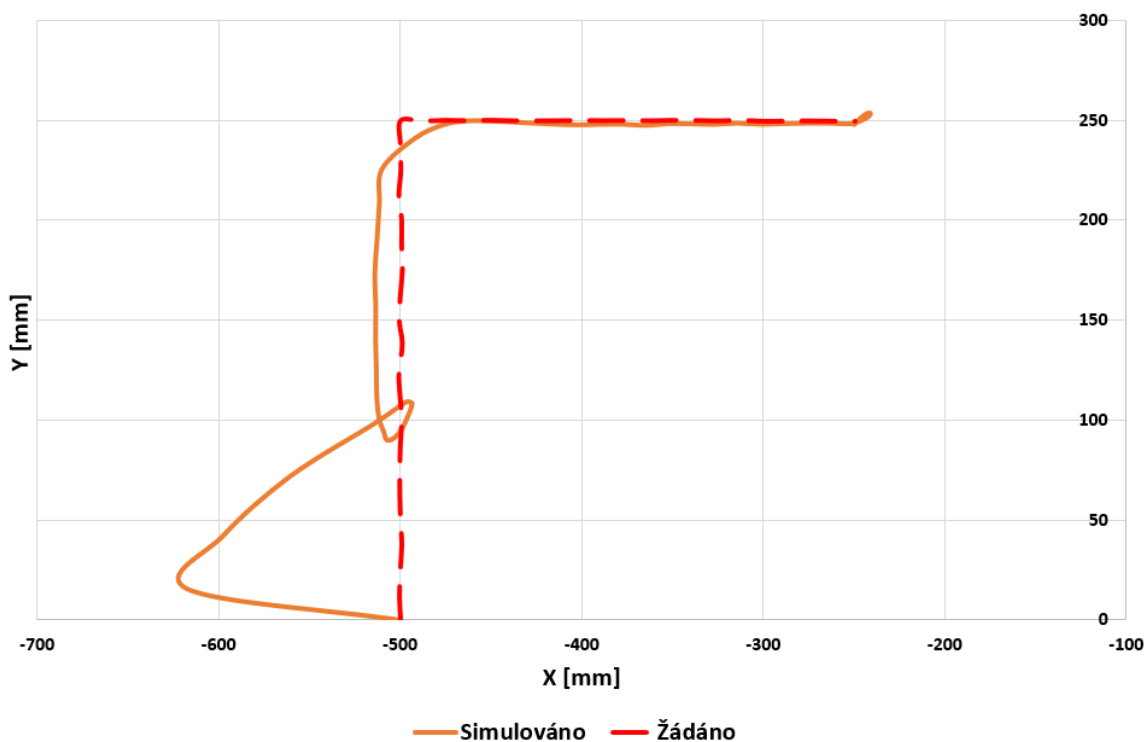
Podobně jako u grafu na obrázku (26) i na grafu v obrázku (28) lze vidět odchylna polohy úhlu φ_2 . Rychlost druhého kloubu také přesáhla udávanou rychlost z tabulky (1). V tomto případě byl regulátor polohy dobře navržen, protože je zde minimální chyba polohy.



Obrázek 29 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při simulaci kruhu

Obrázek (29) opět doplňuje informaci o momentu na druhém kloubu. Za povšimnutí stojí, co se s momentem stane v čase ukončení simulace. Moment si totiž zachová svou hodnotu a stejná věc se bude dít i při reálném měření. To vychází z tlumení, které se v modelu nachází.

5.4.2 Roh



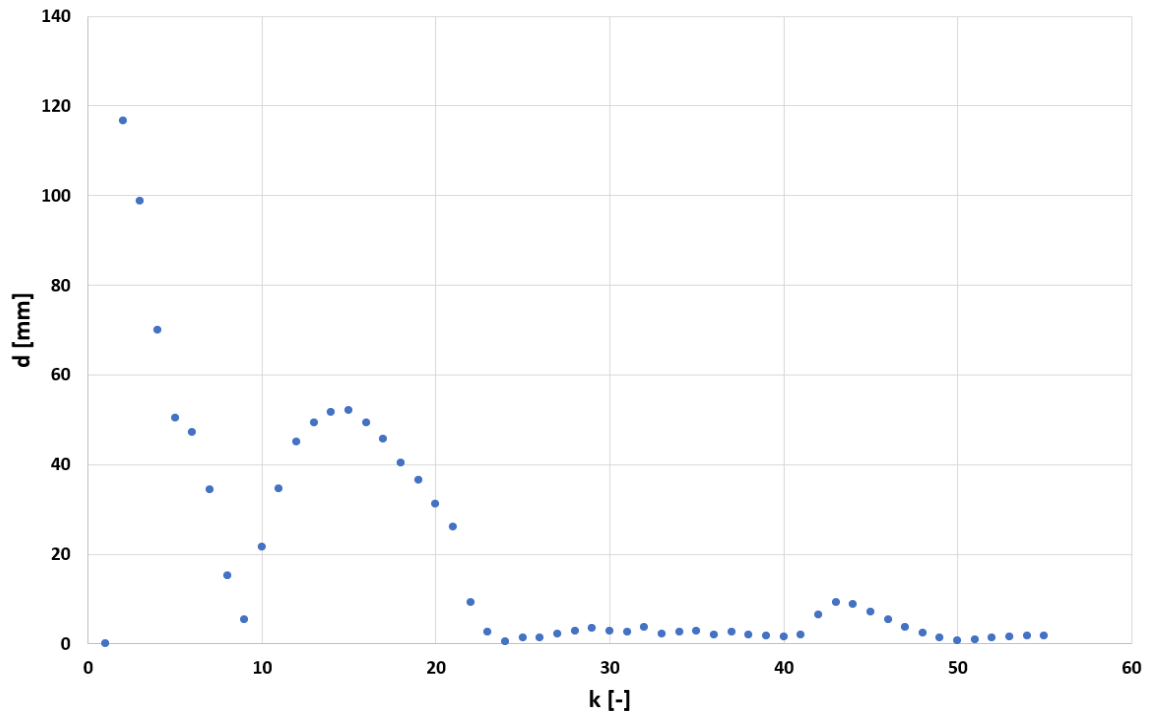
Obrázek 30 Výsledek simulace rohu

Na obrázku (30) se nachází výsledek simulace rohu. Parametry zvolené pro vygenerování této trajektorie pomocí skriptu v příloze (P II) jsou v tabulce (7).

Tabulka 7 Parametry pro generování trajektorie rohu

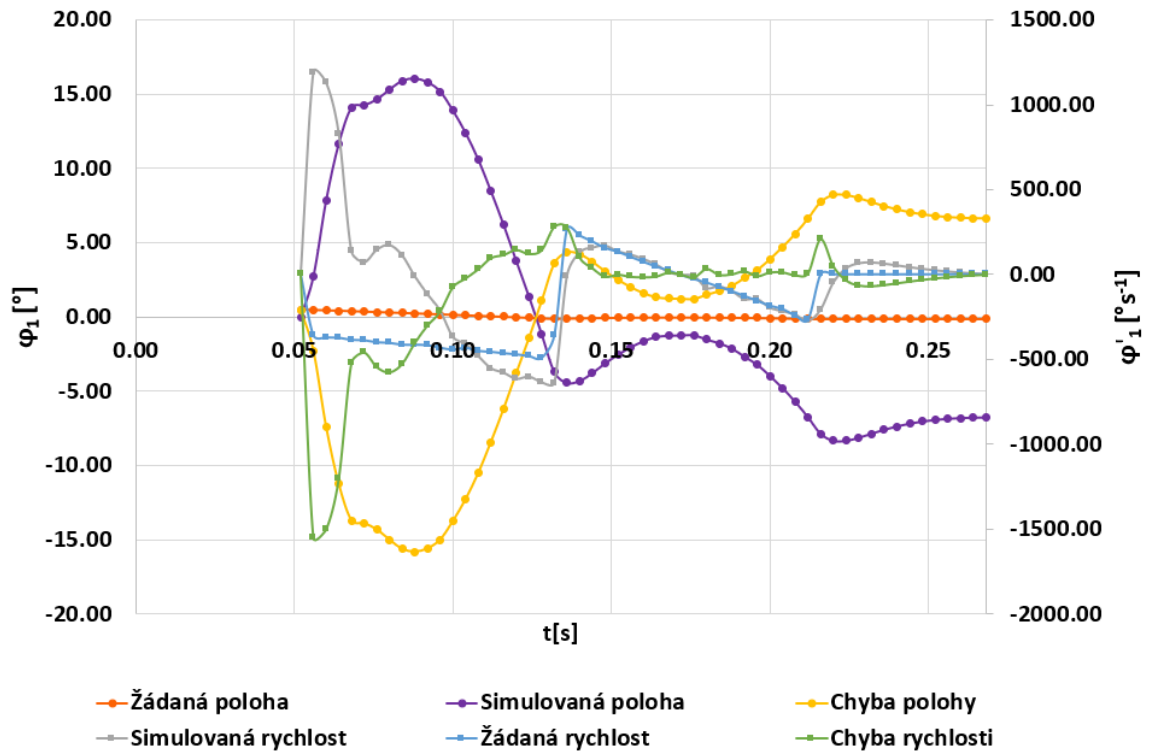
Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
t0	0,0000 [s]	ts	0,0000 [s]
t1	0,2000 [s]	t2	0,4000 [s]
r0	[-250;250;190] [mm]	r1	[-500;250;190] [mm]
r2	[-500;0;190] [mm]		

Z obrázku (30) si nelze nevšimnout chyby regulace. To je zaprvé důsledek navržení regulátorů, ale zadruhé je to i důsledek toho, že tato trajektorie má pouze 55 bodů. To klade velké nároky na rychlost a moment.



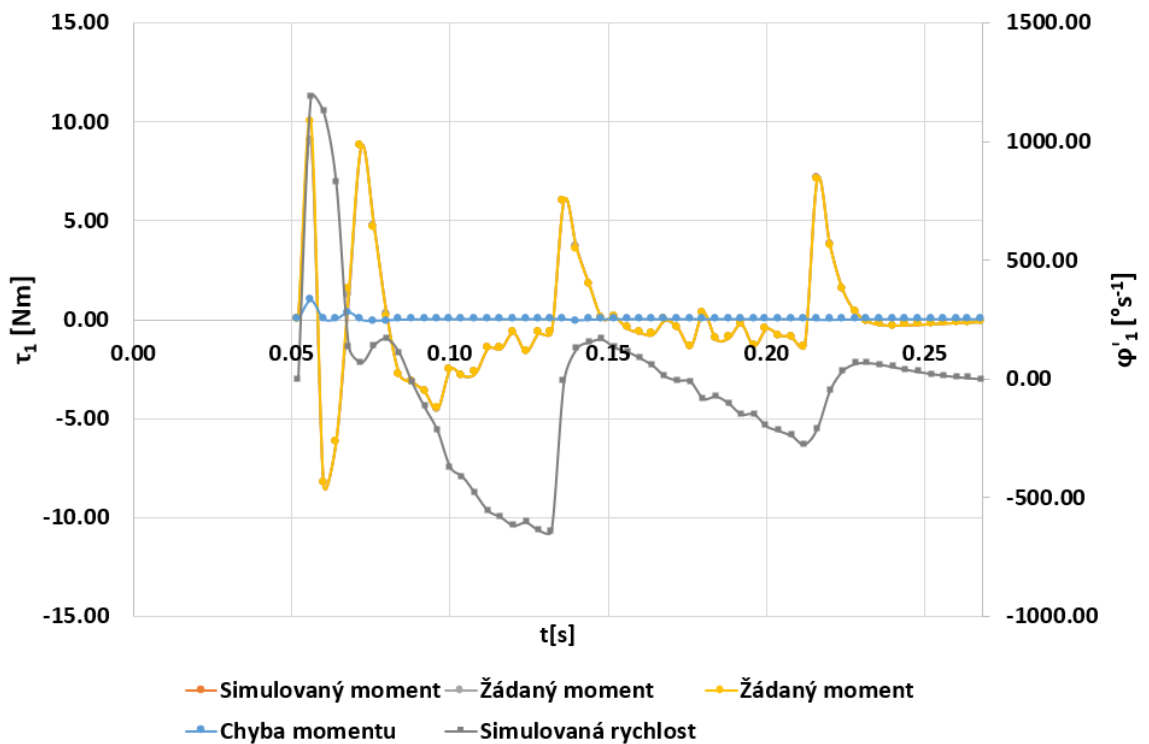
Obrázek 31 Eukleidovská vzdálenost simulovaného rohu od žádaného rohu

Velikost rozdílu simulované trajektorie od žádané je velká viz obrázek (31). Byly použity stejné regulátory jako u simulace kruhu. Vzhledem k odhadu parametrů motoru, převodu, tlumení a celkově pouhého porovnání s reálným robotem byla tato simulace ponechána.

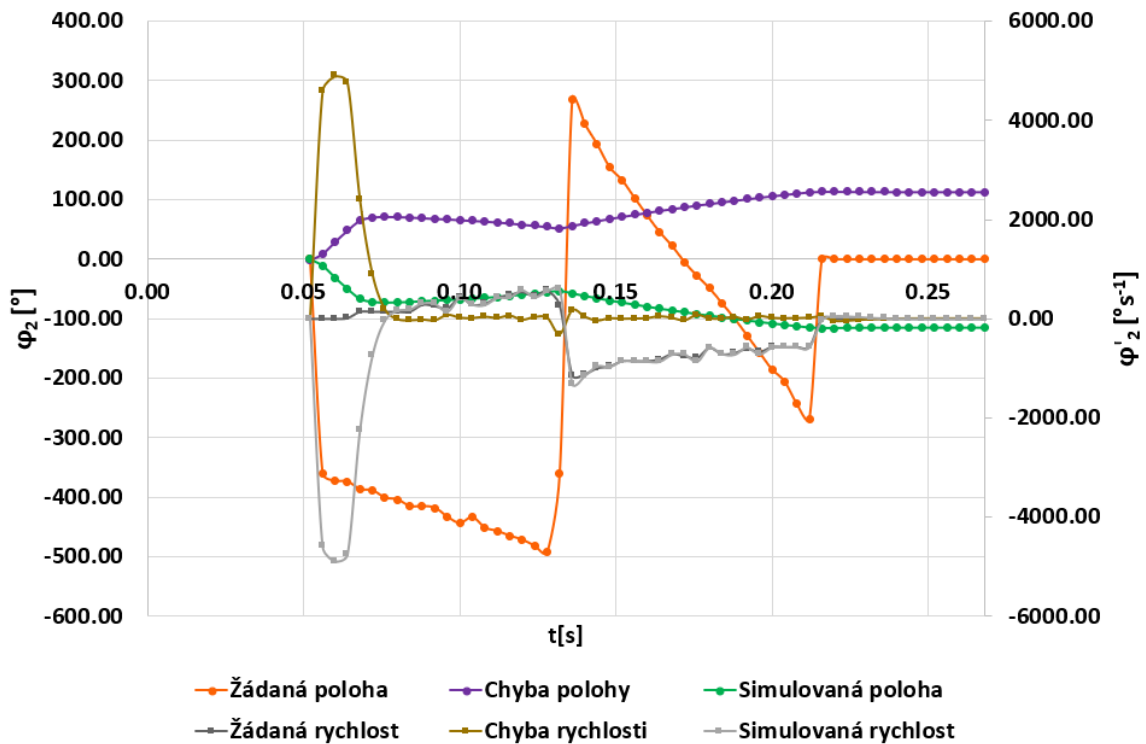


Obrázek 32 Průběhy prvního úhlu ϕ_1 a jeho rychlosti při simulaci rohu

Z obrázku (32) vyplývá opětovné překročení rychlosti z tabulky (1). Na grafu v obrázku (33) je doplněn moment k průběhu rychlosti. I zde se hodně projevila chyba.



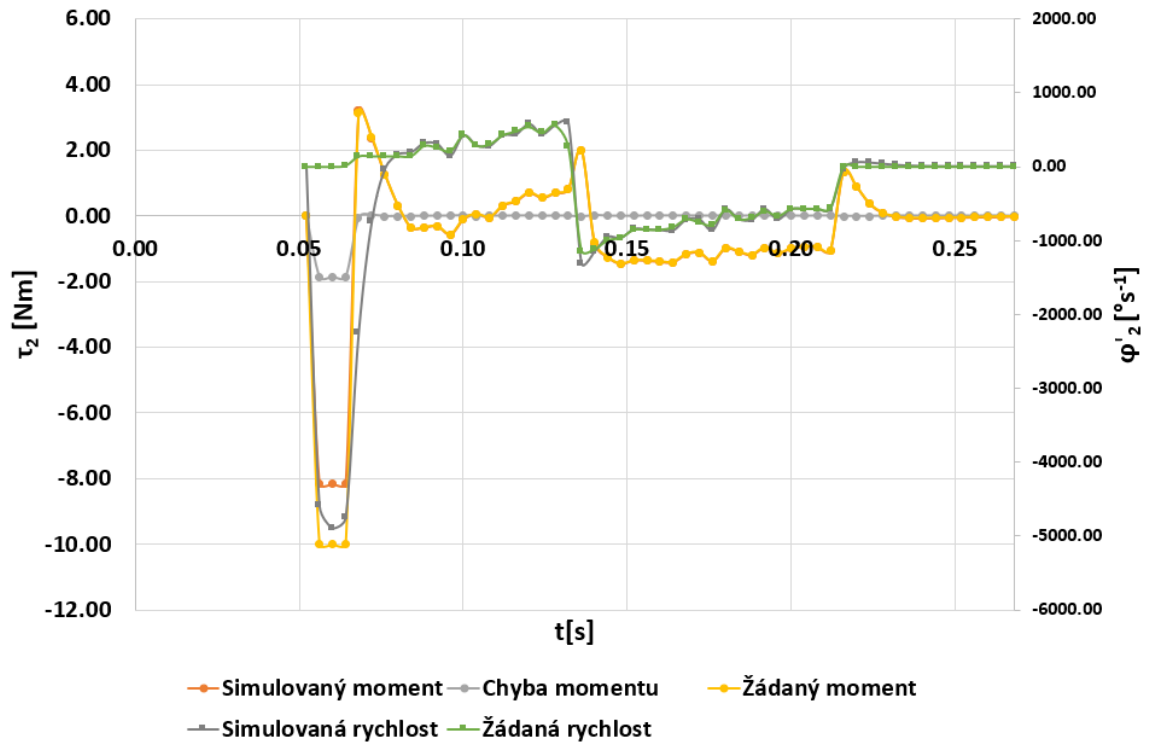
Obrázek 33 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při simulaci rohu



Obrázek 34 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při simulaci rohu

Na obrázku (34) je vidět snaha regulátoru kompenzovat vzniklou chybu podobně jako tomu je u prvního kloubu. Bohužel vzhledem k počtu bodů a charakteru trajektorie se to nezdařilo. Za povšimnutí stojí rychlost. Ta dosáhla velmi vysoké hodnoty $-4898 \text{ [}^\circ\text{s}^{-1}\text{]}$.

Obrázek (35) opět doplňuje informaci o momentu. Vzniklá chyba byla tak velká, že žádaný moment dosáhl saturace. Moment dosáhl po prvotní odchylce nulové regulační odchylky, resp. chyby.



Obrázek 35 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při simulaci rohu

5.5 Měření typových trajektorií na robotu TS2 60

Před každým měřením byl použit příslušný skript pro generování trajektorie a souboru žádaných kloubových proměnných. Oba zmíněné skripty obsahují tzv. „kontrolu fyzikální realizovatelnosti“, která je uvedena na obrázku (23). Tato kontrola má za účel zabránit vytvoření takové trajektorie, která by překročila rychlostní limit z tabulky (1). Vzhledem k povaze měření a snahy získání informace o dynamickém chování byla tato kontrola vypnuta. Nicméně bylo ověřeno, že skutečně funguje a trajektorie vygenerované při zapnuté kontrole nebudou chybové, pokud se trajektorie nachází v pracovním prostoru robotu TS2 60.

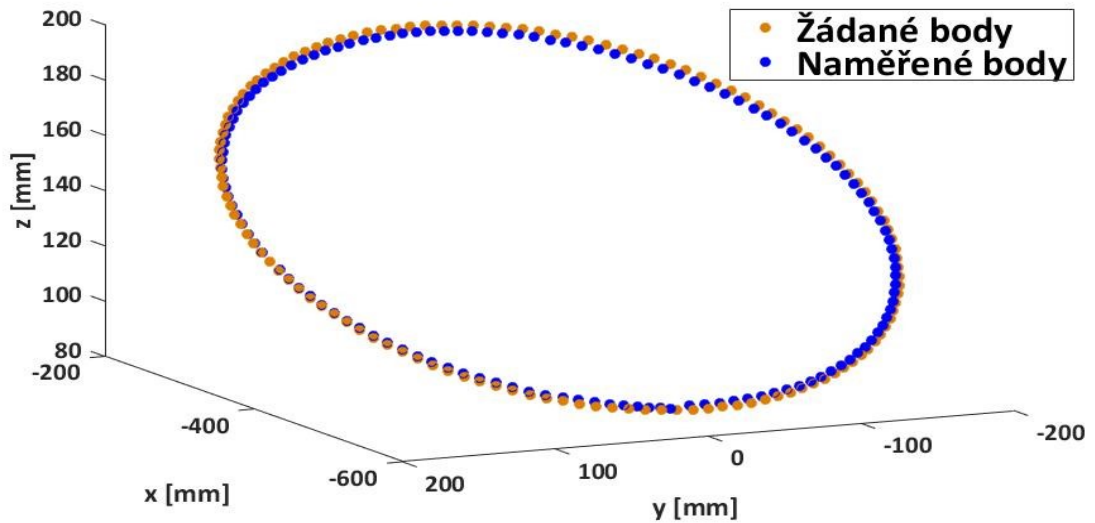
Takto vygenerované kloubové proměnné byly zadány do programu „UlohyUTB“ a následně nahrány do simulace v Stäubli Robotic Suite. Zde pozor! Při simulaci nedošlo k hlášení chyby u trajektorií, které při reálném měření hlásily chybu a robot byl zastaven na brzdách. Výše uvedené parametry u simulace pro generování trajektorie kruhu a rohu jsou nalezenými mezními parametry, které ještě fungují. Pokud by měly o bod méně, byla by hlášena chyba. Navíc před měřením je nutné robot zahřát, protože zadáním trajektorií jako v simulaci by robot opět hlásil chybu. Řešením je zapnutí „kontroly fyzikální realizovatelnosti“ v skriptu a vygenerování kruhu s 500 body. Robot se pak nechá chvíli kroužit a poté je možné přistoupit k měření.

Po úspěšné simulaci a zahřání robotu se v programu „UlohyUTB“ zvolí možnost připojení k robotu TS2 60 a nahrají se žádané kloubové proměnné. Následně robot vykoná pohyb a výsledky měření se uloží na server, z kterého se překopírují do Excelu k vyhodnocení. Měření zaznamenává i nájezd robotu do prvního bodu, a z tohoto důvodu se provede již zmíněné odsazení času u simulace. Bohužel o stejný počet bodů, které jsou zaznamenány se ubere, při najíždění do prvního bodu žádané trajektorie z posledních žádaných bodů trajektorie. Je tedy nutné doplnit trajektorii o další body (do počtu vynechaných) na konci souboru, které slouží k tomu, aby se zaznamenal i poslední bod trajektorie.

Získané výsledky mají u kloubu J2 otočené znaménko. Je nutné si dát pozor na konfiguraci robotu. Z toho důvodu může robot dělat jinou trajektorii, než se žádá. Tento problém lze vyřešit výběrem druhé konfigurace pro druhý kloub robotu.

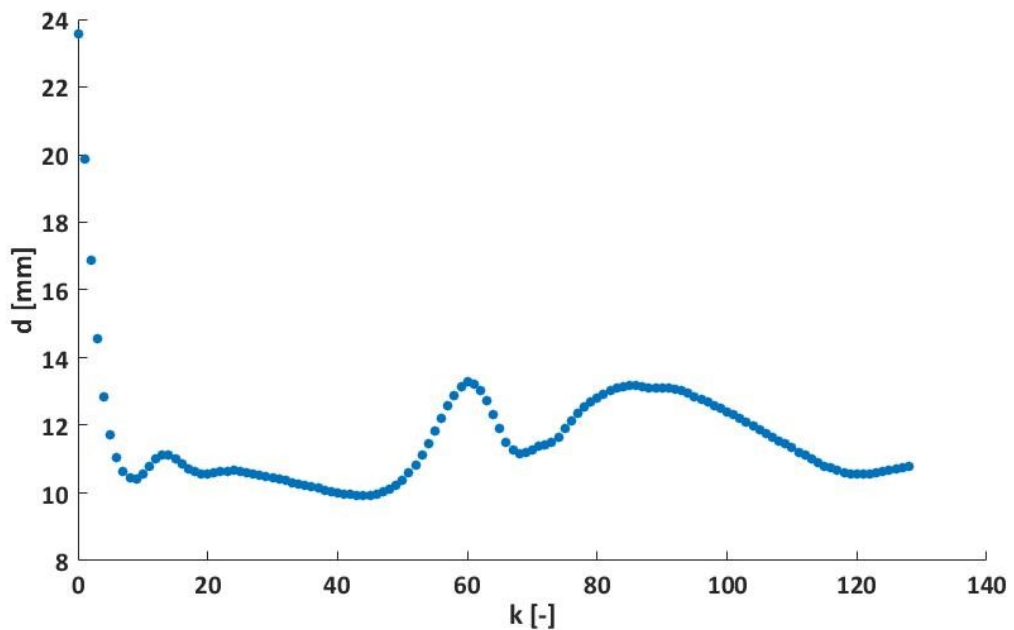
V době měření byl na robot namontován gripper Festo 40 A G2.

5.5.1 Kruh

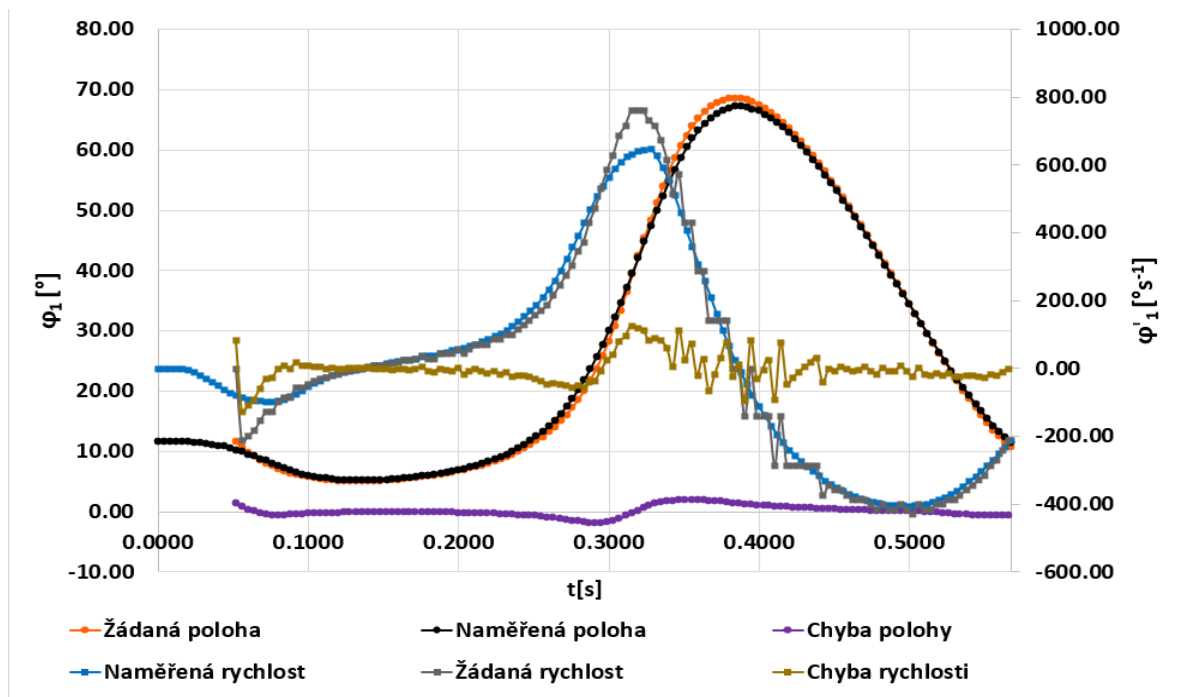


Obrázek 36 Výsledek měření kruhu

Na obrázku (36) se nachází výsledek reálného měření kruhu na robotu TS2 60. Na rozdíl od simulace byl kruh nakloněn na ose Z. Ačkoliv to z obrázku (36) není úplně patrné, na obrázku (37) již lze pozorovat, že v půlce trajektorie kruhu vznikla již znatelná chyba.

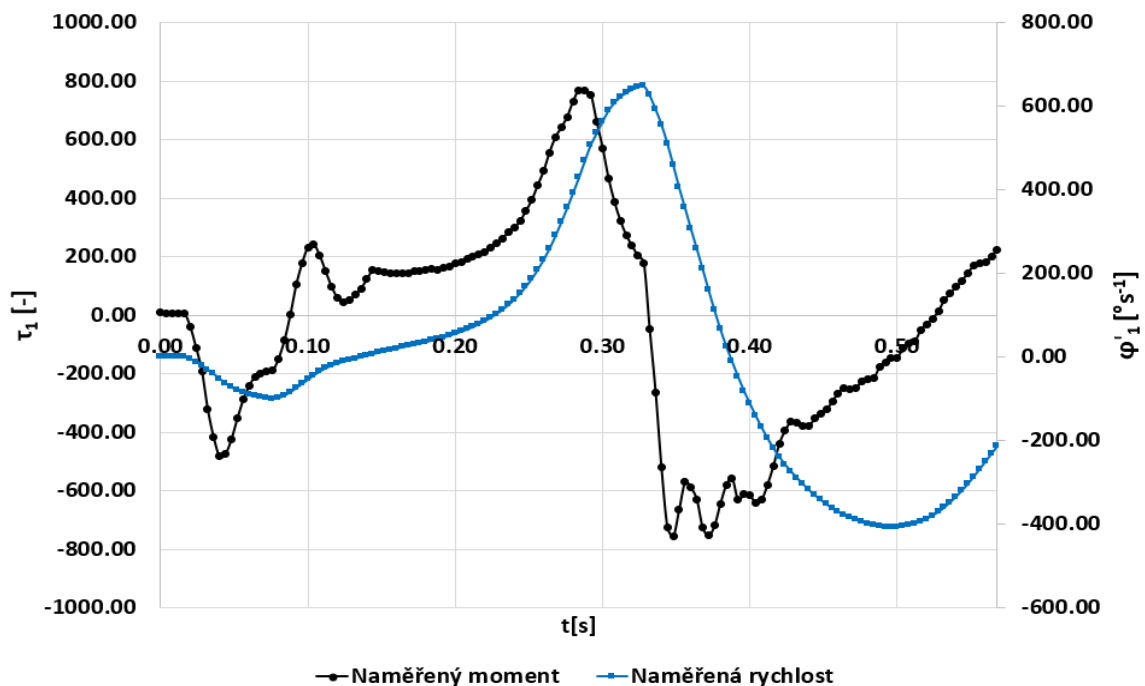


Obrázek 37 Eukleidovská vzdálenost naměřeného kruhu od žádaného kruhu



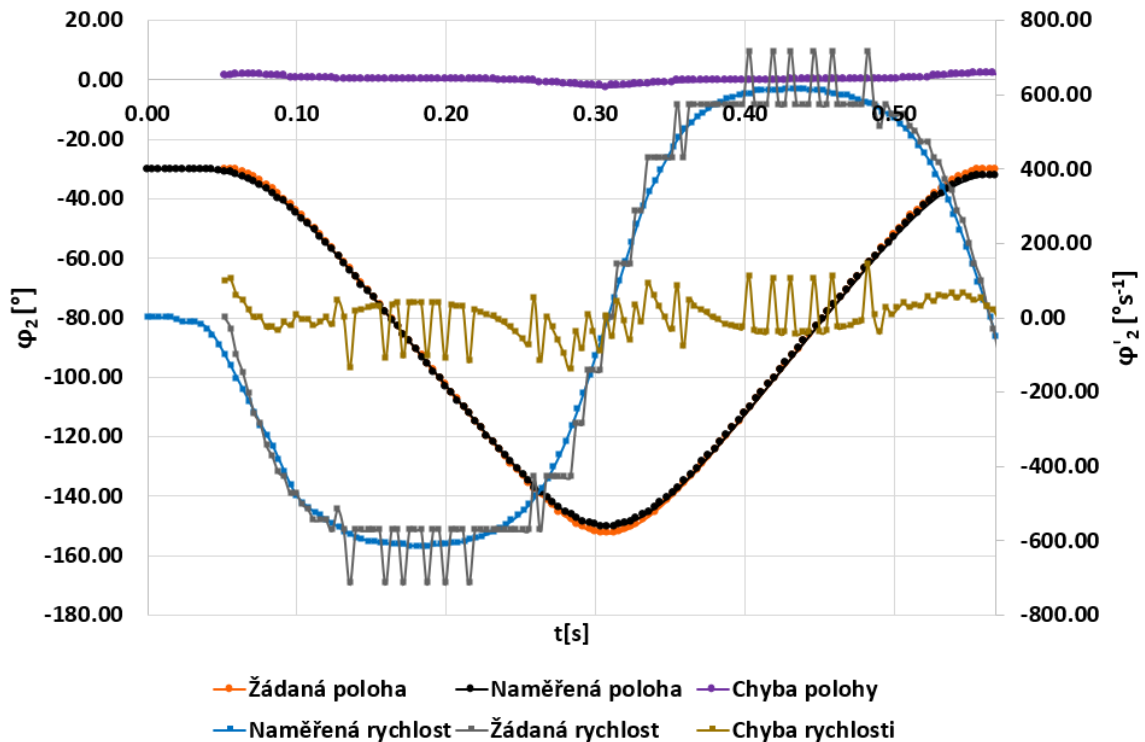
Obrázek 38 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při reálném měření kruhu

Obrázek (38) pouze potvrzuje chybu, která se vyskytuje na grafu v obrázku (37). Zajímavá je rychlost prvního kloubu. Při porovnání se simulací není tak velká, ale i přes to překročila rychlost z tabulky (1). Při měření kruhu se typové chování robotu do jisté míry shoduje se simulací.



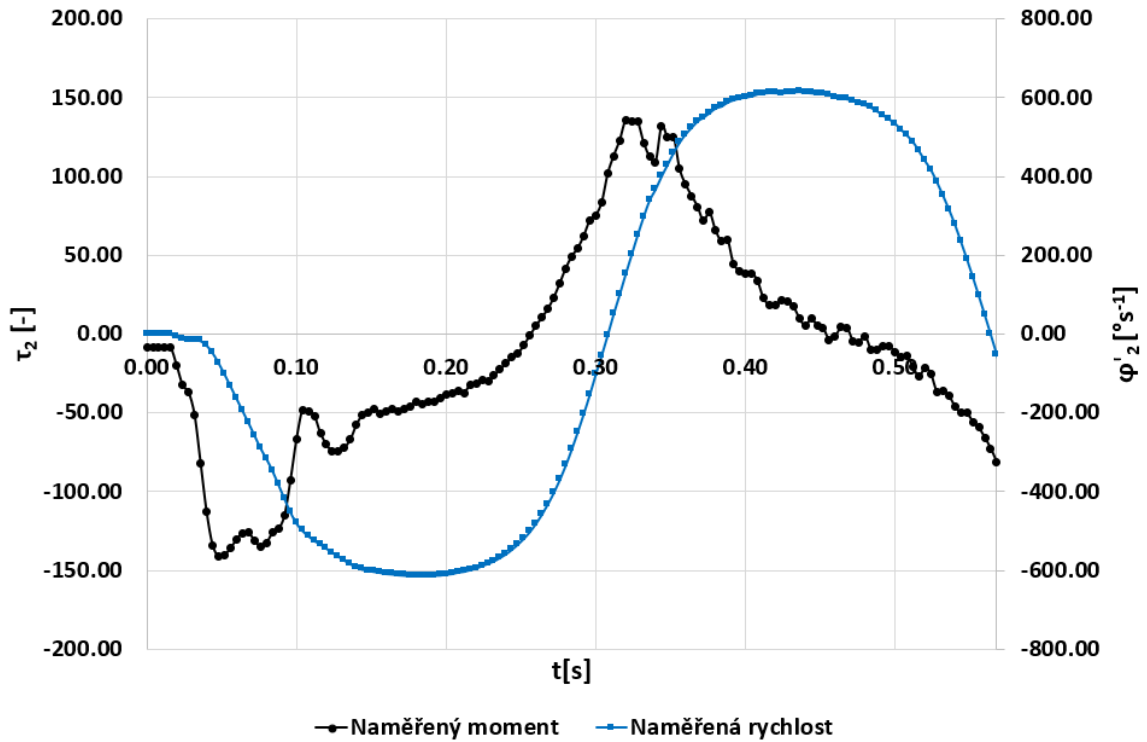
Obrázek 39 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při reálném měření kruhu

Obrázek (39) doplňuje chování momentu. V následujících grafech reálného měření se u momentu nebudou vyskytovat jednotky, protože není známo, čím a v jakých jednotkách je moment měřen. Předpoklad je, že se jedná o proud do motoru i_{qz} viz kapitola teorie 3.2 a simulační model. To má ovšem vliv pouze na jednotky, a nikoliv chování. Za povšimnutí stojí velká změna momentu v polovině trajektorie kruhu. V případě strmější změny již dochází k chybě.

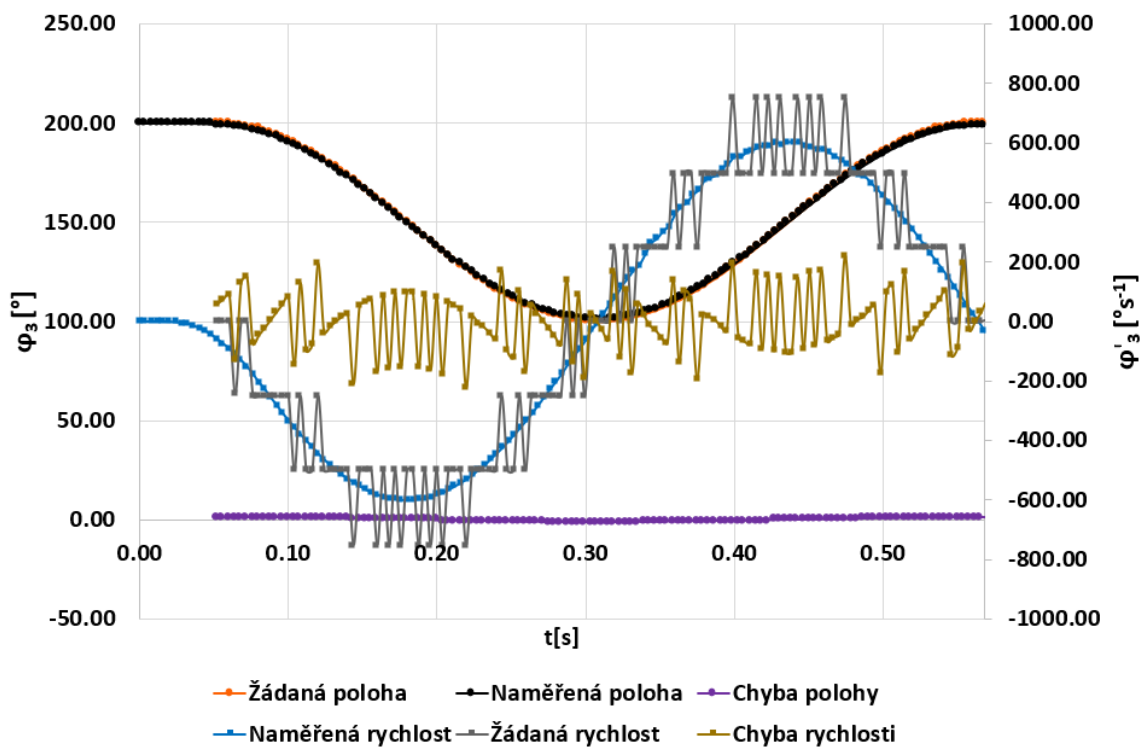


Obrázek 40 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při reálném měření kruhu

Obrázek (40) zobrazuje průběh změny polohy na druhé ose robotu. V tomto případě je chyba polohy minimální a rychlost se nachází pod maximální tabulkovou rychlostí. Obrázek (41) doplňuje moment k průběhu rychlosti opět bez jednotek, jak již bylo řečeno. Největší nárůsty momentu nastanou v počátečním bodě a uprostřed trajektorie.

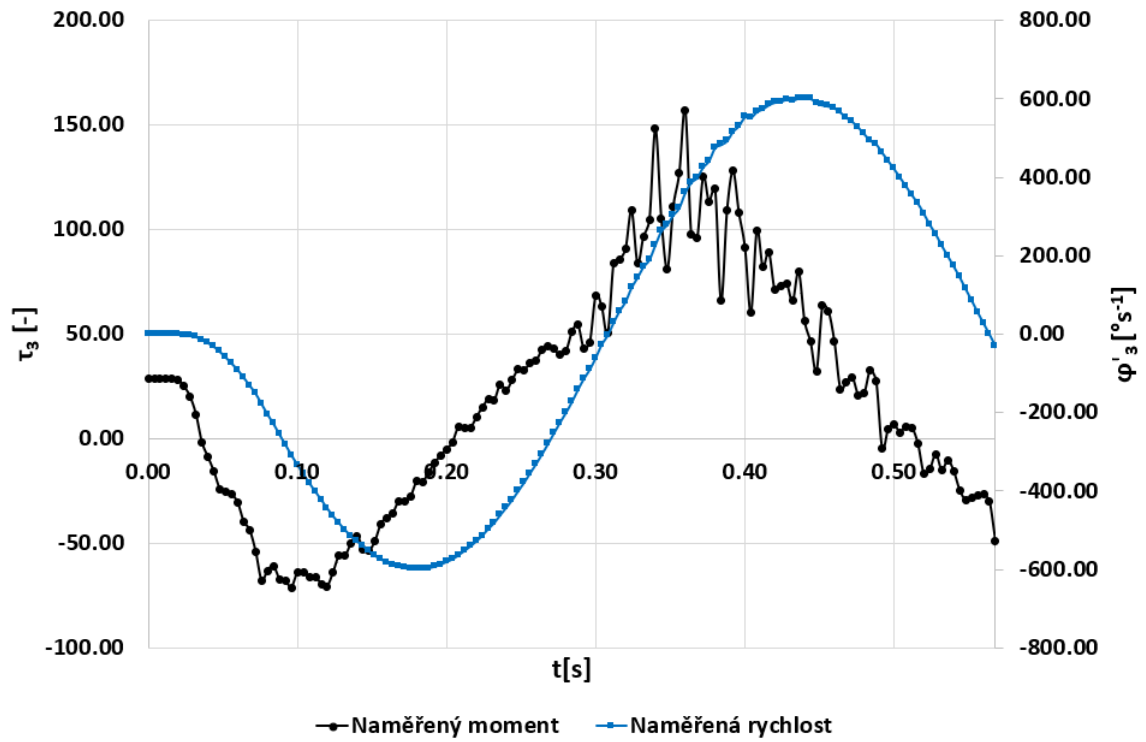


Obrázek 41 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při reálném měření kruhu



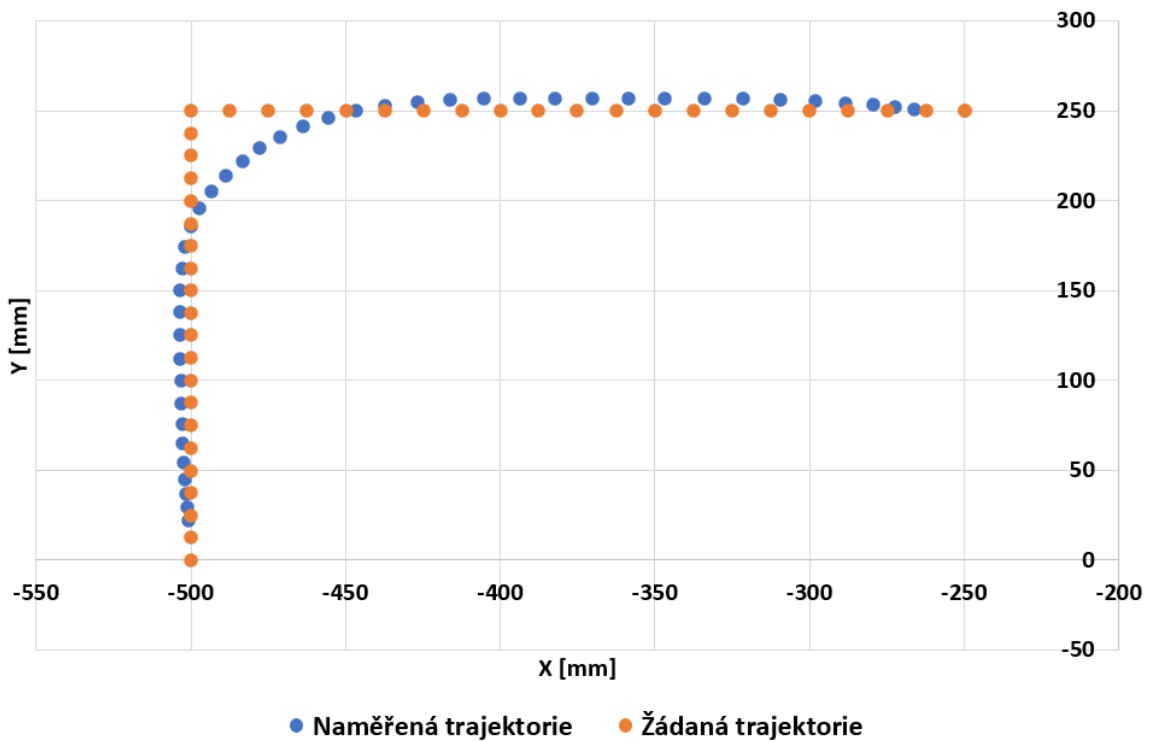
Obrázek 42 Průběhy třetího úhlu ϕ_3 a jeho rychlosti při reálném měření kruhu

U obrázku (42) lze vidět důvod, proč v simulaci byl vynechán třetí kloub. Z naměřených dat vlivem převodového poměru robotu nelze pozorovat žádná zratelná odchylnka od žádaných hodnot.



Obrázek 43 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při reálném měření kruhu

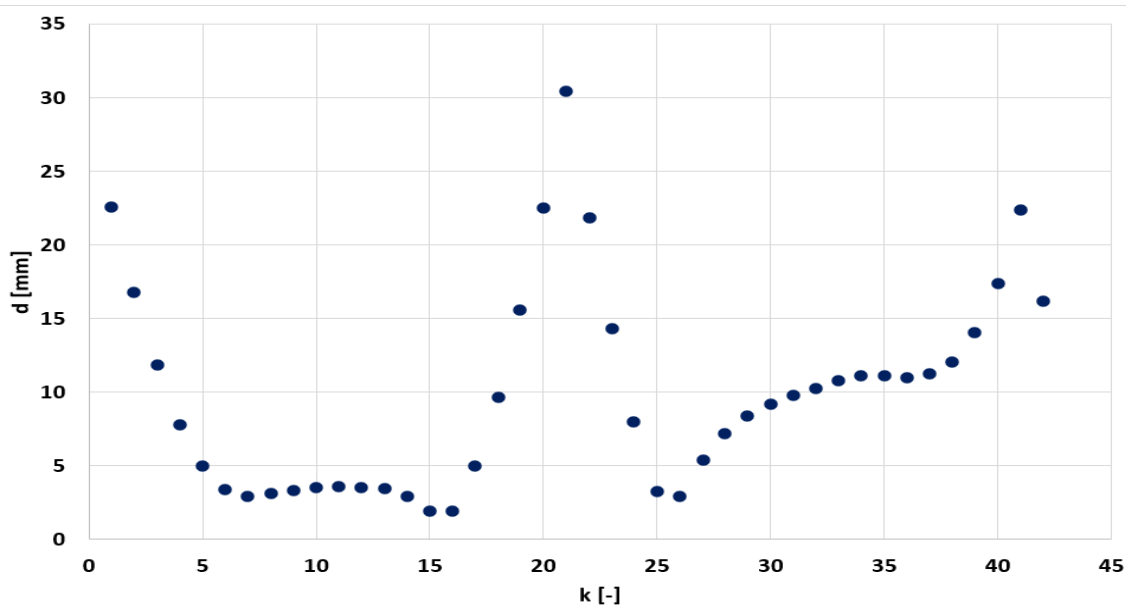
5.5.2 Roh



Obrázek 44 Výsledek měření rohu

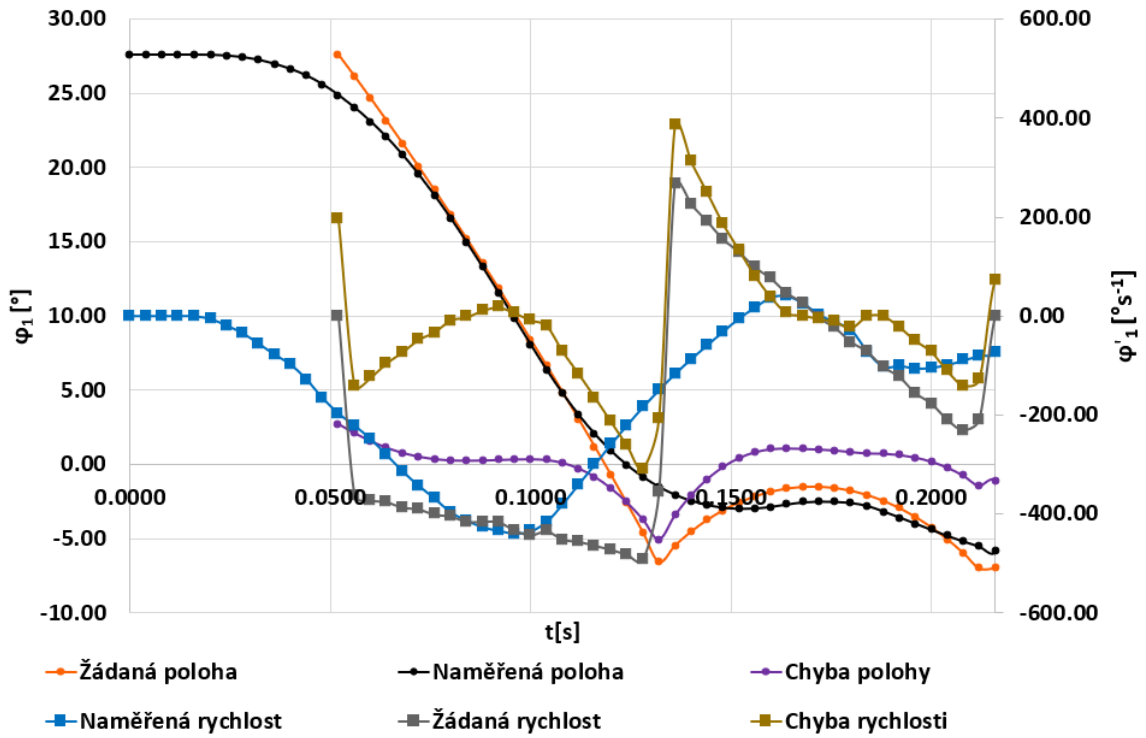
Při měření rohu byly použity stejné žádané hodnoty jako v simulaci. Vzhledem ke konstantní žádané hodnotě na ose Z není osa zobrazena. Na obrázku (44) je vykreslena žádaná a naměřená trajektorie. Lze na ní vidět to, co na první pohled nebylo z obrázku (36) jasné a vysvětluje chybu vzniklou při měření kruhu. Robot se již od počátku nepohyboval po trajektorii, a rovnou začal jít po své vlastní. Došlo tedy nejspíš k interpolaci zadaných žádaných hodnot trajektorie. Za zmínění stojí změna Eukleidovské vzdálenosti v přílohách (PIII), (PIV), (PV) a (PVI). Vzdálenost klesá v prostředním bodě trajektorie rohu, ale nikoliv na začátku a konci trajektorie.

Obrázek (45) ukazuje chybu zhruba dvakrát větší než u kruhu. To i přes nejspíše provedenou interpolaci, navíc prvními a posledními dvěma body trajektorie robot vůbec neprojel. To se na obrázku (45) také projevilo.

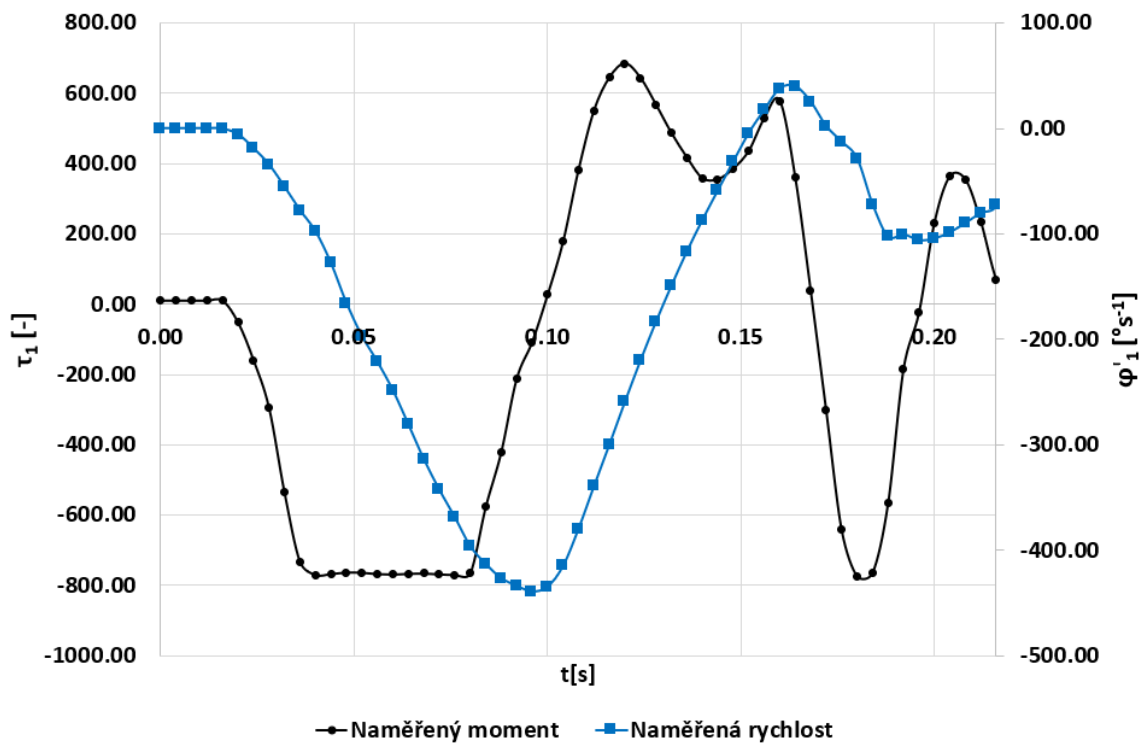


Obrázek 45 Eukleidovská vzdálenost naměřeného rohu od žádaného

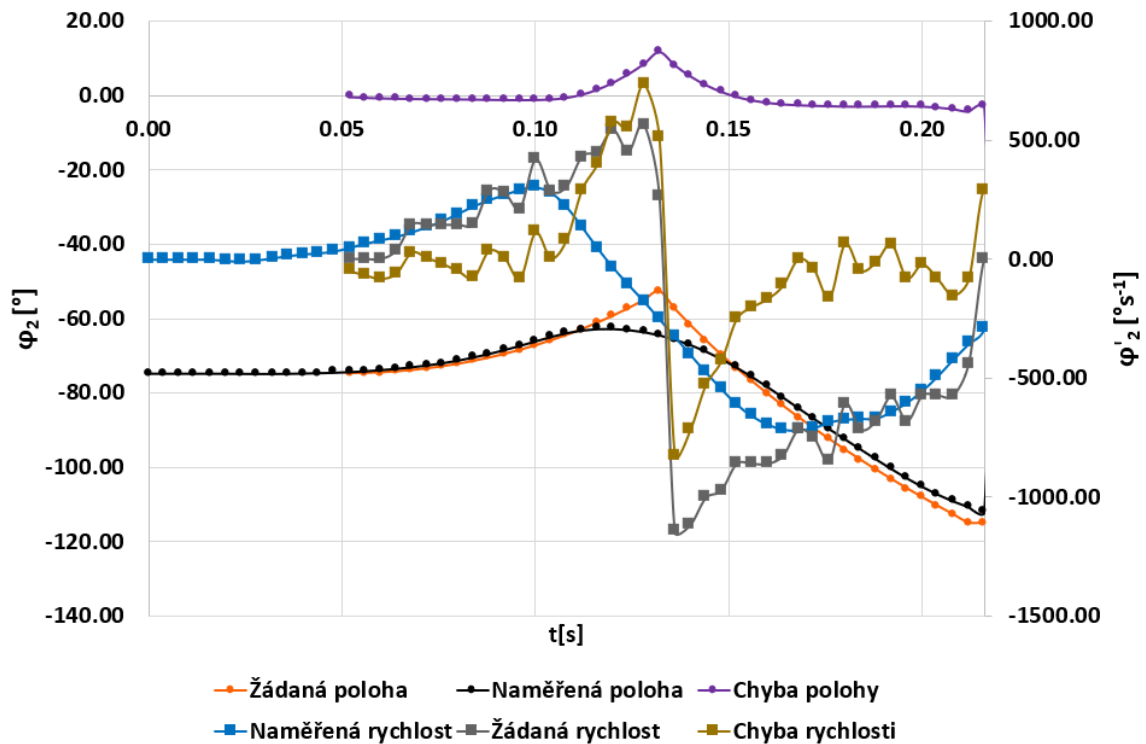
Zmíněná interpolace dává ještě další smysl při pohledu na grafy v obrázcích (46) a (48). Rychlost se i přes pravý úhel rohu drží pod maximální hodnotou. Nicméně moment je na tom oproti kruhu hůř. Na obrázku (46) je již viditelná odchylka od žádané polohy. Ta sice u kruhu byla také, ale zde se vyskytuje častěji.



Obrázek 46 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při reálném měření rohu

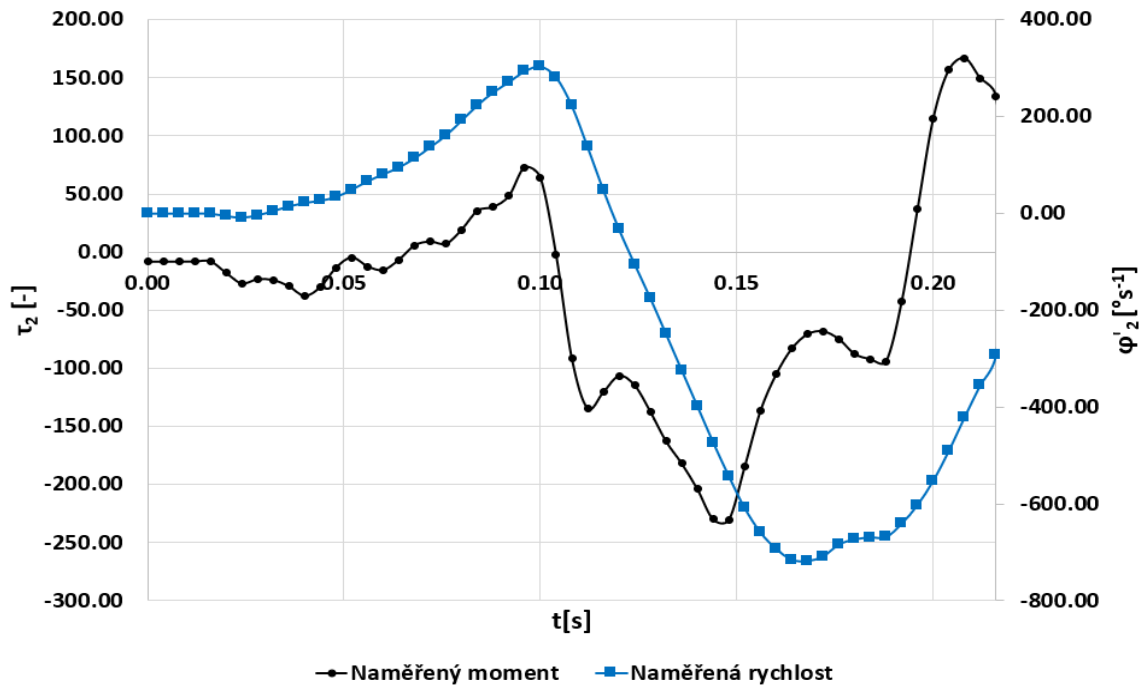


Obrázek 47 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při reálném měření rohu

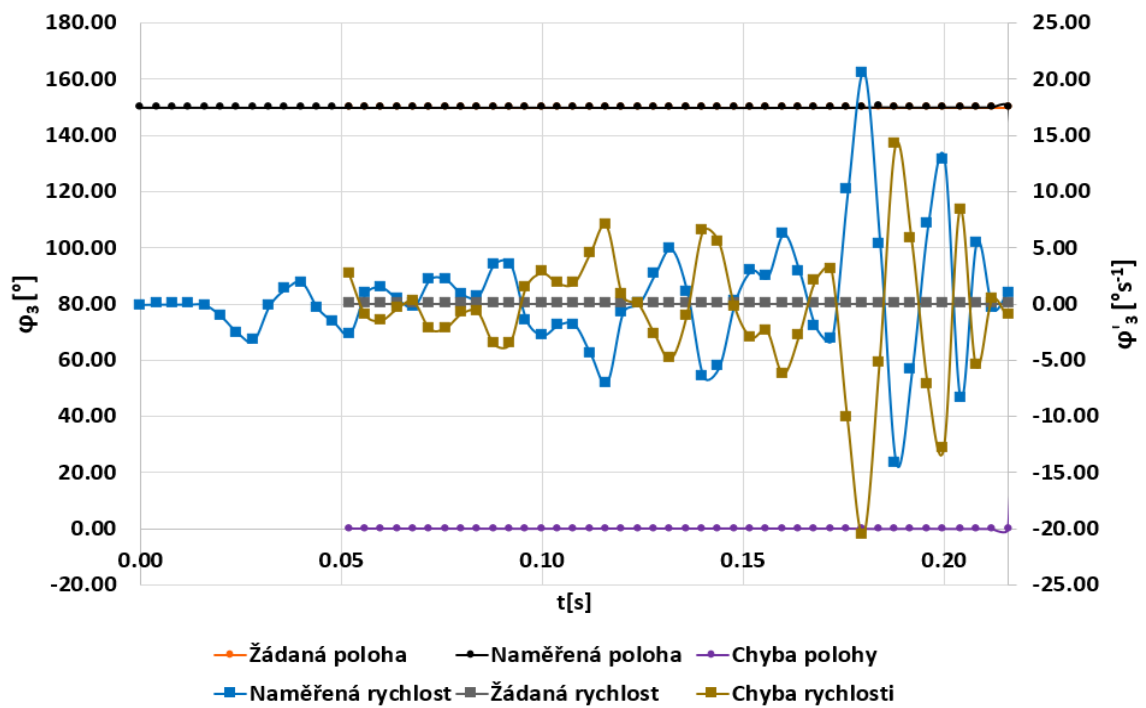


Obrázek 48 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při reálném měření rohu. Chyba polohy druhého kloubu z obrázku (48) vystihuje čas, kdy se měl koncový efektor robotu nacházet v bodu r1. Tato chyba je největší naměřená.

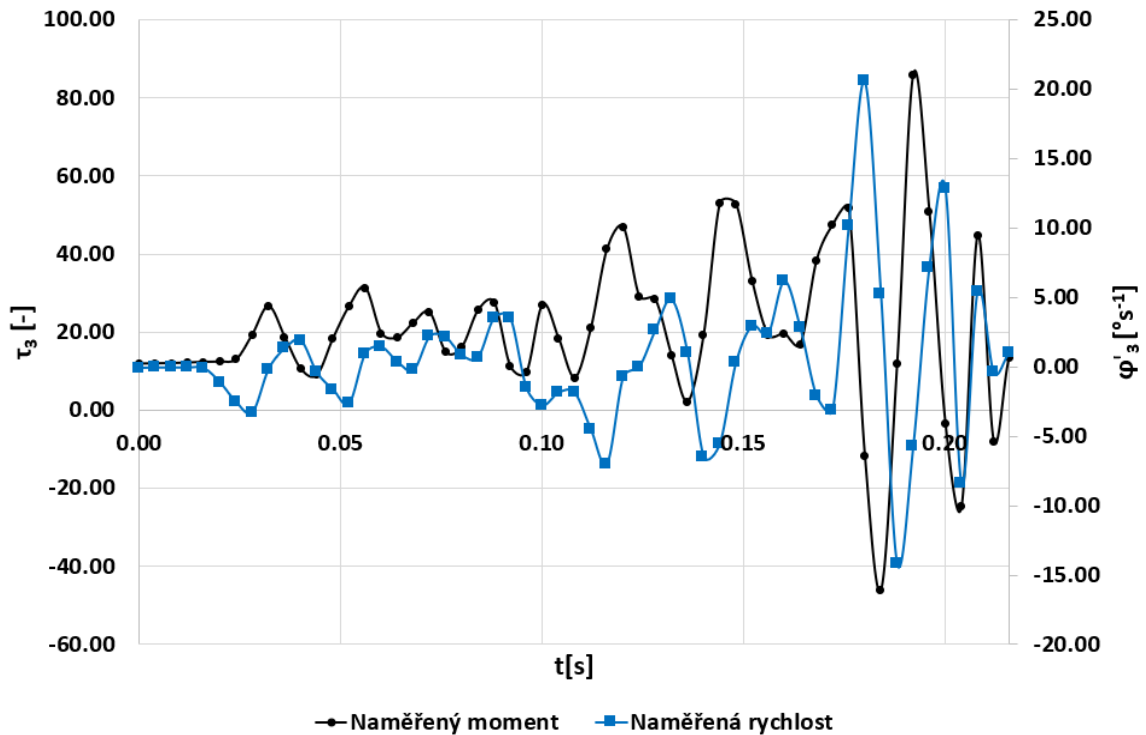
Obrázek (50) potvrzuje, že se na ose Z robot nepohyboval. Vyskytly se pouze malé změny rychlosti, které mohly být způsobeny právě daným pohybem.



Obrázek 49 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při reálném měření rohu



Obrázek 50 Průběhy třetího úhlu φ_3 a jeho rychlosti při reálném měření rohu



Obrázek 51 Průběhy momentu a rychlosti třetího kloubu při reálném měření rohu

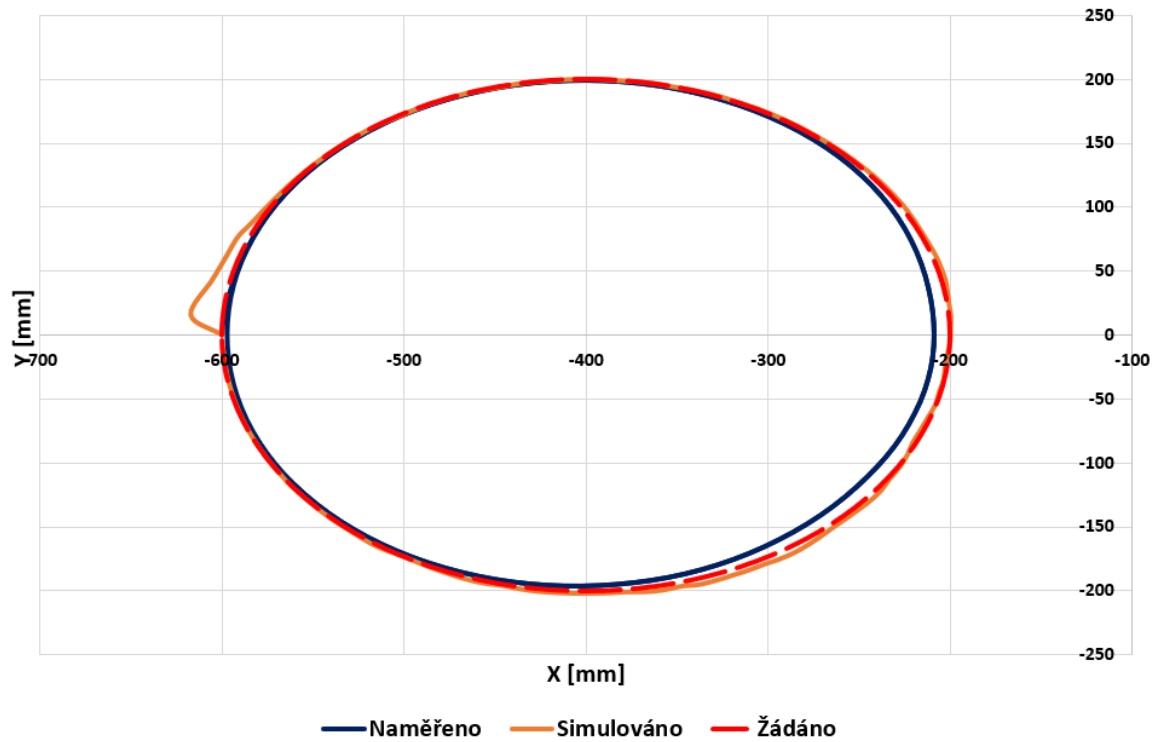
5.6 Porovnání simulace a měření

Následující porovnání simulace a měření slouží především k posouzení, jak dobře byl simulační robot přiblížen reálnému robotu TS2 60. V této kapitole bude vyhodnocena pouze Eukleidovská vzdálenost simulované trajektorie od naměřené. Žádaná trajektorie je do grafů vložena pouze pro představu o tom, co roboti měli za úkol. Porovnání kloubů se nachází v přílohách (P VII) a (P VIII).

V simulaci byl zanedbán třetí kloub, a tím bylo znemožněno se pohybovat v ose Z. Kvůli tomuto porovnání byl změřen ještě jeden kruh, který se na ose Z nemění, jako tomu je v kapitole 5.5.1, ale je tzv. „naležato“ podobně jako v simulaci.

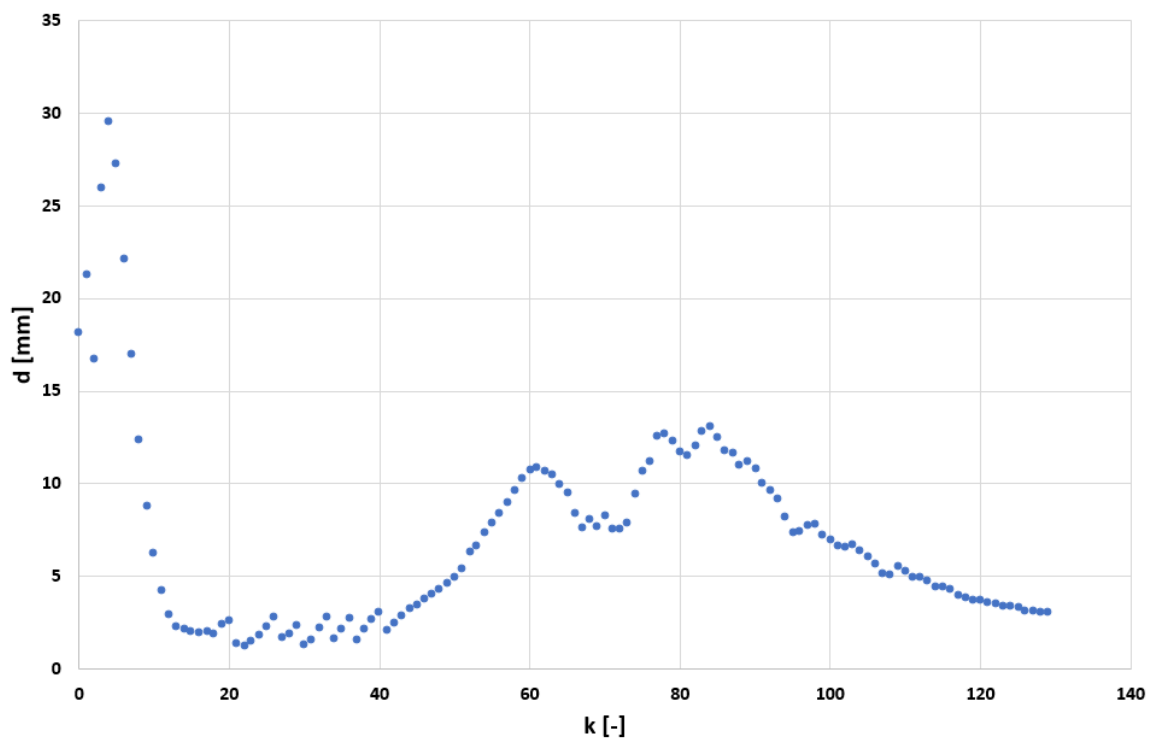
5.6.1 Kruh

Na obrázku (52) je porovnání simulovaného a naměřeného kruhu. Rozdíly jsou na první pohled patrné. Simulovaný kruh má velký překmit na počátku trajektorie kruhu. Naopak naměřený kruh má stálou odchylku od trajektorie kruhu uprostřed trajektorie. V tomto případě není možné konstatovat, že se simulace shoduje s reálným robotem.



Obrázek 52 Porovnání simulovaného a naměřeného kruhu

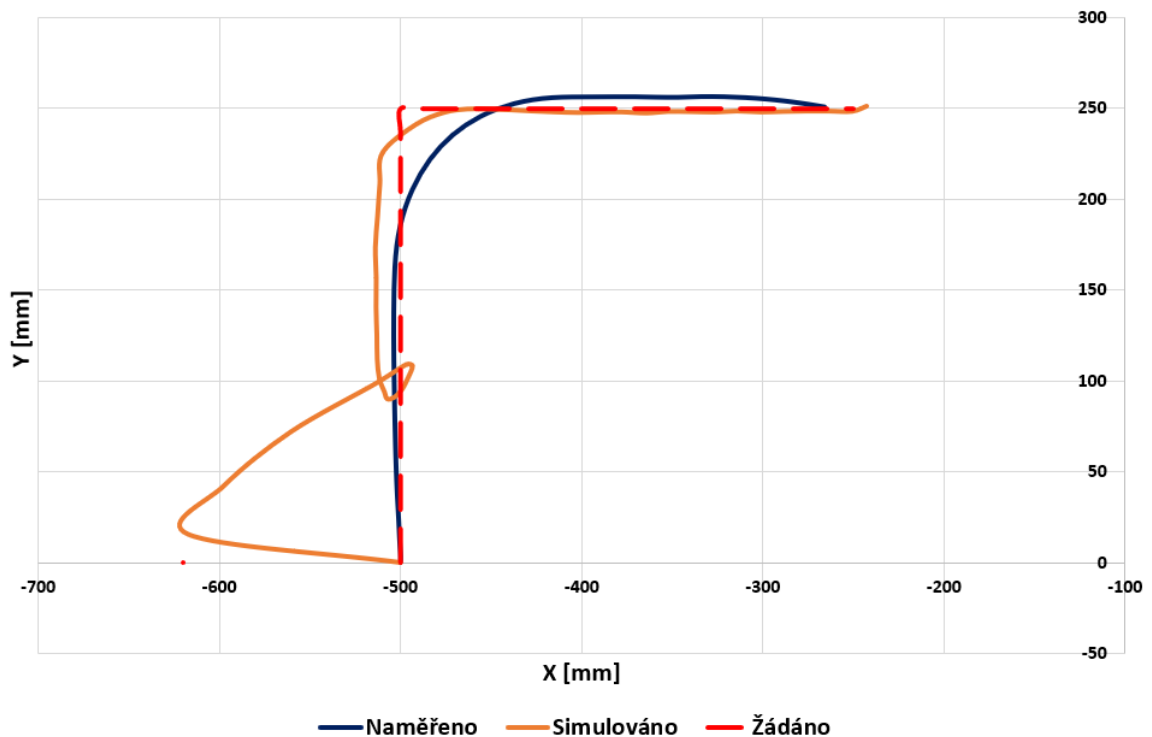
Rozdíly jsou právě nejvíce patrné z obrázku (55). Ani v jednom bodě se kruhy nepotkaly.



Obrázek 53 Eukleidovská vzdálenost naměřeného kruhu od simulovaného

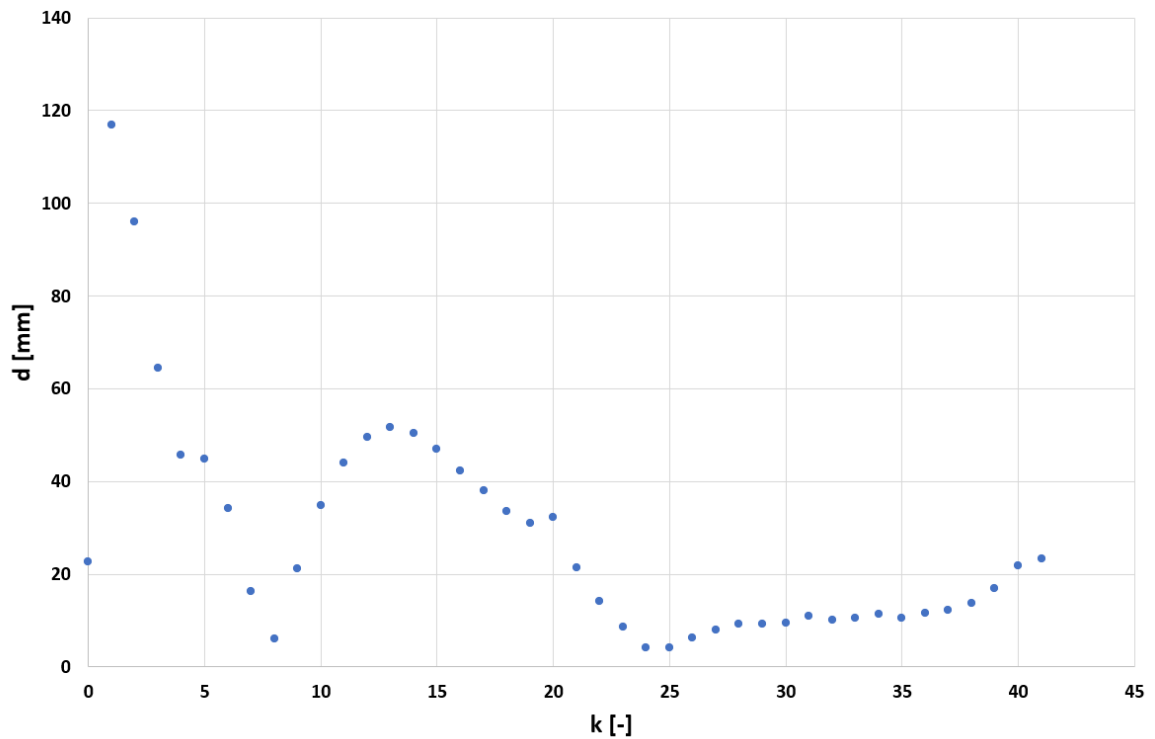
5.6.2 Roh

Obdobně jako u kruhu i zde je patrné, že zde není shoda simulace s reálným modelem. Simulace se snaží držet nulovou regulační odchylku i přesto, že se to nedaří. Oproti měření se drží žádané trajektorie tak, jak je zadaná. Při reálném měření došlo, jak již bylo několikrát zmíněno, nejspíš k interpolaci žádané trajektorie. Tedy i kdyby simulační model odpovídal reálnému robotu TS2 60, pak i přes to by bez tohoto interpolačního algoritmu nebyl schopen vykonat stejnou trajektorii jako reálný robot.



Obrázek 54 Porovnání simulovaného a naměřeného rohu

Obrázek (55) ve shodě s obrázkem (53) dokazuje, že se simulační model liší od reálného robotu. Rozdíly jsou i přes veškerou snahu velké. Nehledě na tuto skutečnost se naměřené výsledky typově chovaly podobně jako simulované, a tím bylo možné předem očekávat možné problémy.



Obrázek 55 Eukleidovská vzdálenost naměřeného rohu od simulovaného

Simulace v Dynastu je schopna zpracovat i ty trajektorie, které není reálný robot schopen vykonat. To je dobré mít na paměti a nespolehat se, že to, co funguje na simulačním modelu, bude fungovat i v reálném zařízení. Simulační model je vhodný pro prvotní odhad dynamického chování robotu SCARA. Obsahuje totiž parametry článků, které jsou vyčteny z 3D modelu robotu TS2 60. Motory, převodový poměr a tlumení jsou odhadnuty.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provedení dynamické analýzy a řízení pohybu robotu SCARA TS2 60 se synchronními elektrickými stroji s permanentním magnetem. Řízení robotu bylo provedeno v programu Dynast, kde rovněž byl sestaven zjednodušený model robotu TS2 60. Pro vytvoření typových trajektorií byl použit Matlab. Pro vygenerované trajektorie byly provedeny simulace, reálné měření a vyhodnocení dosažených výsledků.

Úvod teoretické části krátce představil robot TS2 60. Následně se odkazuje na předchozí bakalářskou práci a plynule na ní navazuje. Z bakalářské práce bylo využito kinematického popisu, který byl určen pro jiný robot stejného typu. Teorie pokračuje stručným popisem, jak vypočítat pohybové rovnice. Byl popsán princip a rovnice sloužící k vytvoření požadovaných trajektorií. Vzhledem k práci s programem Dynast byly v krátkosti popsány základní aspekty nutné k orientaci v simulačním schématu. Nakonec byl popsán motor PMSM, který byl použit v programu Dynast pro simulaci robotu.

V praktické části byly odvozeny pohybové rovnice za pomoci 3D modelu robotu a CAD programu SolidWorks, z kterého byly získány matice setrvačnosti, hmotnosti článků a poloha těžiště. Hmotnost a poloha těžiště článků byly následovně použity do simulačního modelu robotu. Byla navržena regulace, pro zvolenou dvou kloubovou strukturu robotu, která je pouhým zjednodušením SCARA robotu. Zjednodušení spočívá v zanedbání posledních dvou kloubů robotu, které na dynamiku nemají vliv. Dále byly provedeny simulace a jejich vyhodnocení. Praktická část používá stejné trajektorie jako simulace s výjimkou kruhu, která je výše v textu uvedena. Výsledky z provedených měření byly zaznamenány a vyhodnoceny. Vzhledem k absenci informací o motorech a převodech, které sám výrobce odmítl pro tuto práci poskytnout, nebylo možné přiblížit simulační model reálnému robotu. Výsledky simulace a měření na robotu TS2 60 se tedy neshodují. Z reálného měření vyplynulo, že při použití programu „UlohyUTB“ v LabView a následné simulaci v Staubli Robotic Suite nelze odhalit možnou chybu a následné zastavení robotu na brzdách při reálném měření. Z naměřených výsledků lze usoudit, že žádané hodnoty nejspíš prochází interpolací, a tím vzniká chyba mezi žádanou a reálnou trajektorií. Pro činnosti, které vyžadují velkou přesnost jako je například osazování plošných spojů, jej na základě výsledků nelze doporučit.

Z výše uvedeného vyplývá, že byly splněny všechny body zadání této práce. Vytvořené sešity programu Excel a skripty v Matlabu usnadní reprodukci měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SOUKUP, Radim. *Kinematická analýza a programování robotů typu SCARA*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2020, 54 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/47960>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky, Ústav automatizace a řídicí techniky. Vedoucí práce Úředníček, Zdeněk.
- [2] ÚŘEDNÍČEK, Z.: Robotika, skripta UTB ve Zlíně, Zlín 2012. 978-80-7454-233-7
- [3] JAZAR, Reza N. *Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control*. 2. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-32475-3.
- [4] GHOSAL, Ashitava. *Robotics: fundamental concepts and analysis*. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN 978-0-19-567391-3.
- [5] ÚŘEDNÍČEK, Zdeněk. *Elektromechanické akční členy*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-80-7318-835-1.
- [6] MANN, H.: Modeling and Simulation, DynLab, Course on Dynamics of multidisciplinary and controlled Systems, Computing and Information Centre Czech Technical University in Prague. 2006.
- [7] Mann, H., Ševčenko, M.: Příručka k internetovému kurzu a simulačnímu systému DYNAST, Praha 2008.
- [8] **Stäubli** International AG. Stäubli. *Stäubli* [online]. Stäubli International, 2022. Dostupné z: [https://secure.staubli.com/Intranet_Applications/Robotics/Group/RobDoc.nsf/webkey/HP_CADSELECTORCOMM_V3/\\$file/page.html](https://secure.staubli.com/Intranet_Applications/Robotics/Group/RobDoc.nsf/webkey/HP_CADSELECTORCOMM_V3/$file/page.html)
- [9] **Stäubli** International AG. Stäubli TS2-60. *TS2-60 SCARA robot* [online]. Pfäffikon, SZ: Stäubli International, 2022. Dostupné z: <https://www.staubli.com/content/dam/robotics/brochures/scara/datasheet/TS2-60-4-axis-product-data-sheet-EN.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DH	Denavit-Hartenberg.
B_i	Tuhé těleso (i)
${}^{i-1}T_i$	Transformační matice ze souřadné soustavy (i-1) do (i)
O_i	Počátek souřadné soustavy (i)
φ_i, h_i	DH parametry kloubu (i)
I	Matice setrvačnosti
\bar{I}	Matice pseudo-setrvačnosti
r_c	Polohový vektor těžiště
m	hmotnost
$D(\bar{q})$	Symetrická matice setrvačnosti
$\bar{H}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$	Vektor vazeb rychlosti
$\bar{G}(\bar{q})$	Vektor gravitační síly
p_p	Počet pólových párů stroje PMSM
k_n	Konstanta určená typem materiálu permanentního magnetu a geometrickým uspořádáním
PMSM	Synchronní elektrický motor s permanentními magnety

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Zavedené souřadné soustavy[8]	12
Obrázek 2 Tuhý homogenní kvádrový článek[3]	17
Obrázek 3 Parametry kruhu	19
Obrázek 4 Proložení trajektorie rohu parabolou [2]	20
Obrázek 5 Explicitní blok[7]	21
Obrázek 6 Blok integrátoru[7]	22
Obrázek 7 Blok numerické derivace[7]	22
Obrázek 8 Bloky reference[7].....	22
Obrázek 9 Blok synchronního stroje s perm. magnetem[7]	22
Obrázek 10 Blok rotačního tlumiče[7]	22
Obrázek 11 Blok zdroje průtokové veličiny[7]	23
Obrázek 12 Blok zdroje síly[7].....	23
Obrázek 13 Blok převodovky[7]	23
Obrázek 14 Rozdílový blok[7]	23
Obrázek 15 Blok PID regulátoru[7].....	24
Obrázek 16 Tuhý rotační článek[7]	24
Obrázek 17 Základní uspořádání třífázového stroje s vyniklými póly[5]	26
Obrázek 18 Schéma zapojení PMSM stroje pro řízení momentu[5]	30
Obrázek 19 Zavedené souřadné soustavy do 3D modelu[8] v systému SolidWorks ..	32
Obrázek 20 Simulační model.....	36
Obrázek 21 Regulace prvního motoru Motor_1	38
Obrázek 22 Regulace druhého motoru Motor_2	39
Obrázek 23 Vývojový diagram funkce skriptů pro generování trajektorie	40
Obrázek 24 Výsledek simulace kruhu	41
Obrázek 25 Eukleidovská vzdálenost simulovaného kruhu od žádaného kruhu.....	42
Obrázek 26 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při simulaci kruhu	42
Obrázek 27 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při simulaci kruhu.....	43
Obrázek 28 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při simulaci kruhu.....	44
Obrázek 29 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při simulaci kruhu	44
Obrázek 30 Výsledek simulace rohu	45
Obrázek 31 Eukleidovská vzdálenost simulovaného rohu od žádaného rohu.....	46
Obrázek 32 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při simulaci rohu	47

Obrázek 33 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při simulaci rohu.....	47
Obrázek 34 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při simulaci rohu.....	48
Obrázek 35 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při simulaci rohu	49
Obrázek 36 Výsledek měření kruhu	51
Obrázek 37 Eukleidovská vzdálenost naměřeného kruhu od žádaného kruhu.....	51
Obrázek 38 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při reálném měření kruhu	52
Obrázek 39 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při reálném měření kruhu	52
Obrázek 40 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při reálném měření kruhu	53
Obrázek 41 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při reálném měření kruhu	54
Obrázek 42 Průběhy třetího úhlu φ_3 a jeho rychlosti při reálném měření kruhu.....	54
Obrázek 43 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při reálném měření kruhu	55
Obrázek 44 Výsledek měření rohu	55
Obrázek 45 Eukleidovská vzdálenost naměřeného rohu od žádaného	56
Obrázek 46 Průběhy prvního úhlu φ_1 a jeho rychlosti při reálném měření rohu.....	57
Obrázek 47 Průběhy momentu a rychlosti prvního kloubu při reálném měření rohu	57
Obrázek 48 Průběhy druhého úhlu φ_2 a jeho rychlosti při reálném měření rohu	58
Obrázek 49 Průběhy momentu a rychlosti druhého kloubu při reálném měření rohu.....	59
Obrázek 50 Průběhy třetího úhlu φ_3 a jeho rychlosti při reálném měření rohu.....	59
Obrázek 51 Průběhy momentu a rychlosti třetího kloubu při reálném měření rohu	60
Obrázek 52 Porovnání simulovaného a naměřeného kruhu	61
Obrázek 53 Eukleidovská vzdálenost naměřeného kruhu od simulovaného.....	61
Obrázek 54 Porovnání simulovaného a naměřeného rohu	62
Obrázek 55 Eukleidovská vzdálenost naměřeného rohu od simulovaného.....	63

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Parametry robotu TS2 60[9]	11
Tabulka 2 DH parametry[1].....	12
Tabulka 3 Parametry PMSM motorů.....	37
Tabulka 4 Parametry článku č. 1	37
Tabulka 5 Parametry článku č. 2	37
Tabulka 6 Parametry regulátorů	39
Tabulka 7 Parametry pro generování trajektorie rohu	45

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: SKRIPT PRO GENEROVÁNÍ KRUHU (MATLAB)

PŘÍLOHA P II: SKRIPT PRO GENEROVÁNÍ ROHU (MATLAB)

PŘÍLOHA P III SKRIPT PRO VÝPOČET POHYBOVÝCH ROVNIC (MATLAB)

PŘÍLOHA P IV: VYHODNOCENÍ ROHU S 20% PROLOŽENÍM

PŘÍLOHA P V: VYHODNOCENÍ ROHU S 40% PROLOŽENÍM

PŘÍLOHA P VI: VYHODNOCENÍ ROHU S 60% PROLOŽENÍM

PŘÍLOHA P VII: VYHODNOCENÍ ROHU S 80% PROLOŽENÍM

PŘÍLOHA P VIII: VYHODNOCENÍ SIMULACE A MĚŘENÍ KRUHU

PŘÍLOHA P IX: VYHODNOCENÍ SIMULACE A MĚŘENÍ ROHU

PŘÍLOHA P I: SKRIPT PRO GENEROVÁNÍ KRUHU (MATLAB)

```
clear all
close all
clc

%Legenda
%PBK - Počet bodů kruhu
%rK - Poloměr kruhu
%PK - Počátek kruhu [x y z]
%KS - Kloubové souřadnice [Xe,Ye,Ze]
%fi1 - Kloubová proměnná prvního kloubu
%fi2 - Kloubová proměnná druhého kloubu
%fi3 - Kloubová proměnná čtvrtého kloubu
%h2 - Kloubová proměnná třetího kloubu
%NazevSouboru - Název výstupního souboru
%l1 - Konstrukční parametr viz. zavedené souřadné soustavy
%l2 - Konstrukční parametr viz. zavedené souřadné soustavy
%h1 - Konstrukční parametr viz. zavedené souřadné soustavy
%h3 - Konstrukční parametr viz. zavedené souřadné soustavy
%OKS - Ověřené kloubové souřadnice

%Omezení
%Max rychlost
%fi1 = 500°/s = 0.5°/ms *4ms = 2°
%fi2 = 720°/s = 0.72°/ms *4ms = 2.88°
%fi3 = 2500°/s = 2.5°/ms *4ms = 10°
%h2 = 2500mm/s = 2.5mm/ms *4ms = 10mm
%Tsample = 4 ms

%Parametry:
PBK = 129;
rK = 200;
koef = 1;
PK = [-400 0 140];

%Definování konstrukčních parametrů
l1 = 380;
l2 = 240;
h1 = 340;
h3 = 50;

%Inicializace
NazevSouboru = strcat('Kruh_r',num2str(rK),'_b',num2str(PBK),'.csvj');
KS = zeros(PBK,3);
fi1 = zeros(PBK,2);
fi2 = zeros(PBK,2);
fi3 = zeros(PBK,1);
h2 = zeros(PBK,1);
OKS = zeros(PBK,3);
Spdfi2 = zeros(PBK,1);
index=1;

%Výpočet
for uhel=0:(2*pi)/(PBK-1):(2*pi)
    %Vytvoření bodů kruhu
    KS(index,1) = PK(1)+rK*cos(pi-uhel); %X
    KS(index,2) = PK(2)+rK*sin(pi-uhel); %Y
    KS(index,3) = PK(3)+rK/4*cos(pi-uhel); %Z
```

```

%Výpočet inverzní kinematiky
fi2(index,1) = 2*atan2(
...
                                sqrt(((l1+l2)^2)-
(KS(index,1)^2+KS(index,2)^2)),...
                                sqrt(((KS(index,1)^2+KS(index,2)^2)-((l1-l2)^2)))
...
                                );
fi2(index,2) = -fi2(index,1);
fi3(index) = 0;
for i=1:1:2
    fil(index,i)= atan2(
...
                                -KS(index,2)*(l1+l2*cos(fi2(index,i)))-
KS(index,1)*l2*sin(fi2(index,i)),...
                                -
KS(index,1)*(l1+l2*cos(fi2(index,i)))+KS(index,2)*l2*sin(fi2(index,i))
...
                                );
end
h2(index) = 140;%h1-KS(index,3)-h3;

Xs = KS(index,1);
Ys = KS(index,2);
%x_dot =
(((-2*Xs-2*Ys)*sqrt(Xs^2 +Ys^2 -l1^2 +2*l1*l2-
l2^2))/(2*sqrt(l1^2 +2*l1*l2 +l2^2 -Xs^2 -Ys^2)))-...
%
(((2*Xs+2*Ys)*sqrt(l1^2 +2*l1*l2 +l2^2 -Xs^2 -
Ys^2))/(2*sqrt(Xs^2 +Ys^2 -l1^2 +2*l1*l2 -l2^2)))/...
%
(Xs^2 + Ys^2 -l1^2 +2*l1*l2 -l2^2);
%Spdfi2(index) = rad2deg(2*(1/(1+x_dot^2)));
Spdfi2(index) = -(2*(imag(((l1 + l2)^2 - Ys^2 - Xs^2)^(1/2)) -
real((Xs^2 + Ys^2 - (l1 - l2)^2)^(1/2)))^2*((imag((2*Xs + 2*Ys)/(Xs^2 +
Ys^2 - (l1 - l2)^2)^(1/2))/2 - real((2*Xs + 2*Ys)/((l1 + l2)^2 - Ys^2 -
Xs^2)^(1/2))/2)/(imag(((l1 + l2)^2 - Ys^2 - Xs^2)^(1/2)) - real((Xs^2 +
Ys^2 - (l1 - l2)^2)^(1/2))) + ((imag((2*Xs + 2*Ys)/((l1 + l2)^2 - Ys^2 -
Xs^2)^(1/2))/2 + real((2*Xs + 2*Ys)/(Xs^2 + Ys^2 - (l1 -
l2)^2)^(1/2))/2)*(imag((Xs^2 + Ys^2 - (l1 - l2)^2)^(1/2)) + real(((l1 +
l2)^2 - Ys^2 - Xs^2)^(1/2))))/(imag(((l1 + l2)^2 - Ys^2 - Xs^2)^(1/2)) -
real((Xs^2 + Ys^2 - (l1 - l2)^2)^(1/2)))^2)/((imag((Xs^2 + Ys^2 - (l1 -
l2)^2)^(1/2)) + real(((l1 + l2)^2 - Ys^2 - Xs^2)^(1/2)))^2 + (imag(((l1 +
l2)^2 - Ys^2 - Xs^2)^(1/2)) - real((Xs^2 + Ys^2 - (l1 -
l2)^2)^(1/2)))^2);
%Ověření správnosti výpočtu
OKS(index,1) = -l2*cos(fil(index,1)-fi2(index,1))-l1*cos(fil(in-
dex,1));
OKS(index,2) = -l2*sin(fil(index,1)-fi2(index,1))-l1*sin(fil(in-
dex,1));
OKS(index,3) = h1-h2(index)-h3;

%Kontrola splnění fyzikální realizovatelnosti
if index > 1
    if rad2deg(abs(fil(index)-fil(index-1))) > 2*koef
        disp('Chyba fil')
        return
    end
    if rad2deg(abs(fi2(index)-fi2(index-1))) > 2.88*koef
        disp('Chyba fi2')
        return
    end
    if abs(h2(index)-h2(index-1)) > 10*koef
        disp('Chyba h2')
    end
end

```



```

        return
    end
    end
    index = index + 1;
end

fig1 = figure('Name','Kruh','NumberTitle','off');
hold on
for ind=1:1:size(KS,1)-1
    plot3([KS(ind,1) KS(ind+1,1)],...
          [KS(ind,2) KS(ind+1,2)],...
          [KS(ind,3) KS(ind+1,3)], '-o','Color','b','MarkerSize',10,...
          'MarkerFaceColor','b')
    plot3([OKS(ind,1) OKS(ind+1,1)],...
          [OKS(ind,2) OKS(ind+1,2)],...
          [OKS(ind,3) OKS(ind+1,3)], '-o','Color','r','MarkerSize',8,...
          'MarkerFaceColor','r')
end
xlabel('x[mm]','FontSize',16)
ylabel('y[mm]','FontSize',16)
zlabel('z[mm]','FontSize',16)
hold off

%Vykreslení jednotlivých žádaných hodnot do kloubů
fig2 = figure('Name','Zadane hodnoty','NumberTitle','off');
hold on
subplot(2,2,1)
plot((0:1:length(fi1)-1)*4,rad2deg(fi1))
xlabel('t[ms]','FontSize',16)
ylabel('\phi_1[rad]')
title('\phi_1')

subplot(2,2,2)
plot((0:1:length(fi1)-1)*4,fi2)
xlabel('t[ms]','FontSize',16)
ylabel('\phi_2[rad]')
title('\phi_2')

subplot(2,2,3)
plot((0:1:length(fi1)-1)*4,fi3)
xlabel('t[ms]','FontSize',16)
ylabel('\phi_3[rad]')
title('\phi_3')

subplot(2,2,4)
plot((0:1:length(fi1)-1)*4,h2)
xlabel('t[ms]','FontSize',16)
ylabel('h_2[rad]')
title('h_2')
hold off

%Zápis dat do souboru
dlmwrite(NazevSouboru,[rad2deg(fi1(:,1)) rad2deg(fi2(:,2)) h2 fi3],'de-
limiter',';')

```

PŘÍLOHA P II: SKRIPT PRO GENEROVÁNÍ ROHU (MATLAB)

```
clc
clear all
close all

%Legenda
%NazevSouboru - Název věšstupného souboru
%t0- Āšas poĀĀĀtku (r0)
%t1 - Āšas v polovinĀ trajektorie (r1)
%ts - Āšas k urĀĀenĀ plĀmepnutĀ (t1-ts) a (t1+ts)
%t2 - Āšas dokonĀĀenĀ (r2)
%T - Perioda vzorkovĀnĀ
%z - Hodnota osy Z
%r0 - prvnĀ zadanĀ bod
%r1 - druhĀ zadanĀ bod
%r2 - tĀmetĀ zadanĀ bod
%k - pomocnĀ index
t0 = 0; %[s]
t1 = 0.2; %[s]
ts = 0; %[s]
t2 = 0.4; %[s]
T = 0.02;%0.004; %[s]
z = 190; % [mm]
koef = 1;
NazevSouboru =
strcat('Roh_p',num2str(ts*100),'_T',num2str(T*100),'.csvj');
X = -500;
Y = 250;
POS = Y;
r0 = [X+POS;Y;z]; % [mm]
r1 = [X;Y;z]; % [mm]
r2 = [X;Y-POS;z]; % [mm]

k = 1;

PBK = t2/T +1;
fi1 = zeros(PBK,2);
fi2 = zeros(PBK,2);
fi3 = zeros(PBK,1);
h2 = zeros(PBK,1);

%DefinovĀnĀ konstrukĀnĀch parametrĀ
l1 = 380;
l2 = 240;
h1 = 340;
h3 = 0;
index = 1;
% VytvoĀmenĀ okna
fig = figure('Name','Roh','NumberTitle','off');
hold on

% Cyklus pro
for t = t0:T:t2
    % Trajektorie od r(t0) po r(t1-ts)
    if t0 <= t && t <= t1-ts
        r = r1 - ((t1-t)/(t1-t0))*(r1-r0);
    end

    % Trajektorie od r(t1-ts) po r(t1+ts)
```

```

if t1-ts <= t && t <= t1+ts
    r = r1 - ((t-ts-t1)^2 / (4*ts*(t1-t0)))*(r1-r0)+...
        (((t+ts-t1)^2) / (4*ts*(t2-t1)))*(r2-r1);
end

% Trajektorie od r(t1+ts) po r(t2)
if t1+ts <= t && t <= t2
    r = r1 - ((t1-t)/(t2-t1))*(r2-r1);
end

% VykreslenĀ bodu do vytvořĀného okna
scatter3(r(1),r(2),r(3),'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor',[0 0
1]);
hold on

% VĀřpořĀtet inverznĀ kinematiky
fi2(index,1) = 2*atan2(
...
    sqrt(((l1+l2)^2)-(r(1)^2+r(2)^2)),...
    sqrt((r(1)^2+r(2)^2)-((l1-l2)^2)) ...
);
fi2(index,2) = -fi2(index,1);
for i=1:1:2
    fil(index,i)= atan2(
...
        -r(2)*(l1+l2*cos(fi2(index,i)))-
r(1)*l2*sin(fi2(index,i)),...
        -r(1)*(l1+l2*cos(fi2(in-
dex,i)))+r(2)*l2*sin(fi2(index,i)) ...
    );
end
h2(index) = h1-r(3)-h3;
% OvĀřĀvnosti vĀřpořĀtu
OKS(1) = -l2*cos(fil(index,1)-fi2(index,1))-l1*cos(fil(index,1));
OKS(2) = -l2*sin(fil(index,1)-fi2(index,1))-l1*sin(fil(index,1));
OKS(3) = h1-h2(index)-h3;
scatter3(OKS(1),OKS(2),OKS(3),'MarkerEdgeColor','r');
hold on
% NařtenĀ bodu do struktury
s(k).x = r(1);
s(k).y = r(2);
s(k).z = r(3);

% ZĀznam Āřasu
if k == 1
    cas(k) = T;
else
    cas(k) = cas(k-1) + T;
end

%Kontrola splnĀnĀ fyzikĀlnĀ realizovatelnosti
if index > 1
    if rad2deg(abs(fil(index)-fil(index-1))) > 2*koef
        disp('Chyba fil')
        return
    end
    if rad2deg(abs(fi2(index)-fi2(index-1))) > 2.88*koef
        disp('Chyba fi2')
        return
    end
    if abs(h2(index)-h2(index-1)) > 10*koef

```

```

                disp('Chyba h2')
                return
            end
        end
        % Inkrementace pomocnÄ©ho indexu
        k = k +1;
        index = index+1;
    end
    xlabel('x[mm]', 'FontSize',16)
    ylabel('y[mm]', 'FontSize',16)
    zlabel('z[mm]', 'FontSize',16)
    hold off

    fig2 = figure('Name','Zadane hodnoty','NumberTitle','off');
    hold on
    subplot(2,2,1)
    plot((0:1:length(fi1)-1)*4, fi1)
    xlabel('t[ms]', 'FontSize',16)
    ylabel('\phi_1[rad]')
    title('\phi_1')

    subplot(2,2,2)
    plot((0:1:length(fi1)-1)*4, fi2)
    xlabel('t[ms]', 'FontSize',16)
    ylabel('\phi_2[rad]')
    title('\phi_2')

    subplot(2,2,3)
    plot((0:1:length(fi1)-1)*4, fi3)
    xlabel('t[ms]', 'FontSize',16)
    ylabel('\phi_3[rad]')
    title('\phi_3')

    subplot(2,2,4)
    plot((0:1:length(fi1)-1)*4, h2)
    xlabel('t[ms]', 'FontSize',16)
    ylabel('h_2[rad]')
    title('h_2')
    hold off
    index = 1;

    % ZÄ©pis do souboru
    dlmwrite(NazevSouboru, [flipud(rad2deg(fi1(:,1)))
        flipud(rad2deg(fi2(:,2))) h2 fi3], 'delimiter',';')

```

PŘÍLOHA P III SKRIPT PRO VÝPOČET POHYBOVÝCH ROVNIC (MATLAB)

```
%Smazání všeho + zavření oken
clear all
close all
clc

syms fi1 fi2 l1 l2 h1 h2 g

%g = 9.81;% [m/s^2]

T1 = [-cos(fi1)  sin(fi1)  0 -l1*cos(fi1);...
      -sin(fi1) -cos(fi1)  0 -l1*sin(fi1);...
       0         0      1         h1;...
       0         0      0         1];
T2 = [-cos(fi1-fi2)  sin(fi1-fi2)  0 -l2*cos(fi1-fi2)-l1*cos(fi1);...
      -sin(fi1-fi2) -cos(fi1-fi2)  0 -l2*sin(fi1-fi2)-l1*sin(fi1);...
       0             0            1             h1-h2;...
       0             0            0             1];

syms r1x r1y r1z
%r1 = [-0.32795;0.00001;-0.03333;1]; %[m]
r1 = [-l1/2;0;0;1]; %[m]
%m1 = 11.07342; %[kg]
syms m1

syms r2x r2y r2z
%r2 = [-0.15307;0.00155;0.39234;1]; %[m]
r2 = [-l2/2;0;0;1]; %[m]
%m2 = 10.91544; %[kg]
syms m2
% Moment setrvačnosti: ( kilogramů * metry čtvereční )
% Získány z výstupního souřadného systému č.1.
syms d1 hh1
%Ix = 0.060431;
%Iy = 0.248975;
%Iz = 0.265246;
Ix = (m1/12)*(d1^2 +hh1^2);
Iy = (m1/12)*(l1^2 +hh1^2);
Iz = (m1/12)*(l1^2 +d1^2);
I1 = [Ix  0  0;...
      0  Iy  0;...
      0  0  Iz];
clear Ix Iy Iz

% Moment setrvačnosti: ( kilogramů * metry čtvereční )
% Získány z výstupního souřadného systému č.2.
syms d2 hh2
Ix = (m1/12)*(d2^2 +hh2^2);
Iy = (m1/12)*(l2^2 +hh2^2);
Iz = (m1/12)*(l2^2 +d2^2);
I2 = [Ix  0  0;...
      0  Iy  0;...
      0  0  Iz];
clear Ix Iy Iz

%Maticice pseudo-setrvačnosti
I1p = MaticicePseudoSetrvačnosti( I1, r1, m1);
I2p = MaticicePseudoSetrvačnosti( I2, r2, m2);
```

```

%Symetrické matice setrvačnosti
D = SymetrickeMaticeSetrvacnosti( T1 ,T2 , I1p, I2p);

%Vektor vazev rychlosti
H = VektroVazevRychlosti( T1, T2, I1p, I2p);

%Vektro gravitační síly
clear g
syms g
G = VektorGravitacniSily( T1, T2, r1, r2, g, m1, m2 );

syms fi1_d2 fi2_d2

%Pohybové rovnice
Q1 = D(1,1)*fi1_d2 + D(1,2)*fi2_d2 + H(1) + G(1);
Q2 = D(2,1)*fi1_d2 + D(2,2)*fi2_d2 + H(2) + G(2);

```

```

function [ H ] = VektroVazevRychlosti( T1,T2,I1p,I2p )
syms fi1 fi2 fi1_d1 fi2_d1

H111 = trace((diff(diff(T1,fi1),fi1))*I1p*transpose(diff(T1,fi1)))+...
        trace((diff(diff(T2,fi1),fi1))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
H112 = trace((diff(diff(T2,fi1),fi2))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
H121 = trace((diff(diff(T2,fi2),fi1))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
H122 = trace((diff(diff(T2,fi2),fi2))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
H211 = trace((diff(diff(T2,fi1),fi1))*I2p*transpose(diff(T2,fi2)));
H212 = trace((diff(diff(T2,fi1),fi2))*I2p*transpose(diff(T2,fi2)));
H221 = trace((diff(diff(T2,fi2),fi1))*I2p*transpose(diff(T2,fi2)));
H222 = trace((diff(diff(T2,fi2),fi2))*I2p*transpose(diff(T2,fi2)));

H1 = H111*fi1_d1*fi1_d1+...
      H112*fi1_d1*fi2_d1+...
      H121*fi2_d1*fi1_d1+...
      H122*fi2_d1*fi2_d1;
H2 = H211*fi1_d1*fi1_d1+...
      H212*fi1_d1*fi2_d1+...
      H221*fi2_d1*fi1_d1+...
      H222*fi2_d1*fi2_d1;

H = [H1;H2];
end

```

```

function [ D ] = SymetrickeMaticeSetrvacnosti( T1 ,T2 , I1p, I2p)
syms fi1 fi2
D11 = trace((diff(T1,fi1))*I1p*transpose(diff(T1,fi1)))+...
        trace((diff(T2,fi1))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
D12 = trace((diff(T2,fi2))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
D21 = trace((diff(T2,fi1))*I2p*transpose(diff(T2,fi1)));
D22 = trace((diff(T2,fi2))*I2p*transpose(diff(T2,fi2)));

D = [D11 D12;...
      D21 D22];
end

```

```

function [ G ] = VektorGravitacniSily( T1, T2, r1, r2, g, m1, m2 )
syms fi1 fi2

G1 = - m1*[0,0,-g,0]*diff(T1,fi1)*r1 - m2*[0,0,-g,0]*diff(T2,fi1)*r2;
G2 = - m2*[0,0,-g,0]*diff(T2,fi2)*r2;

```

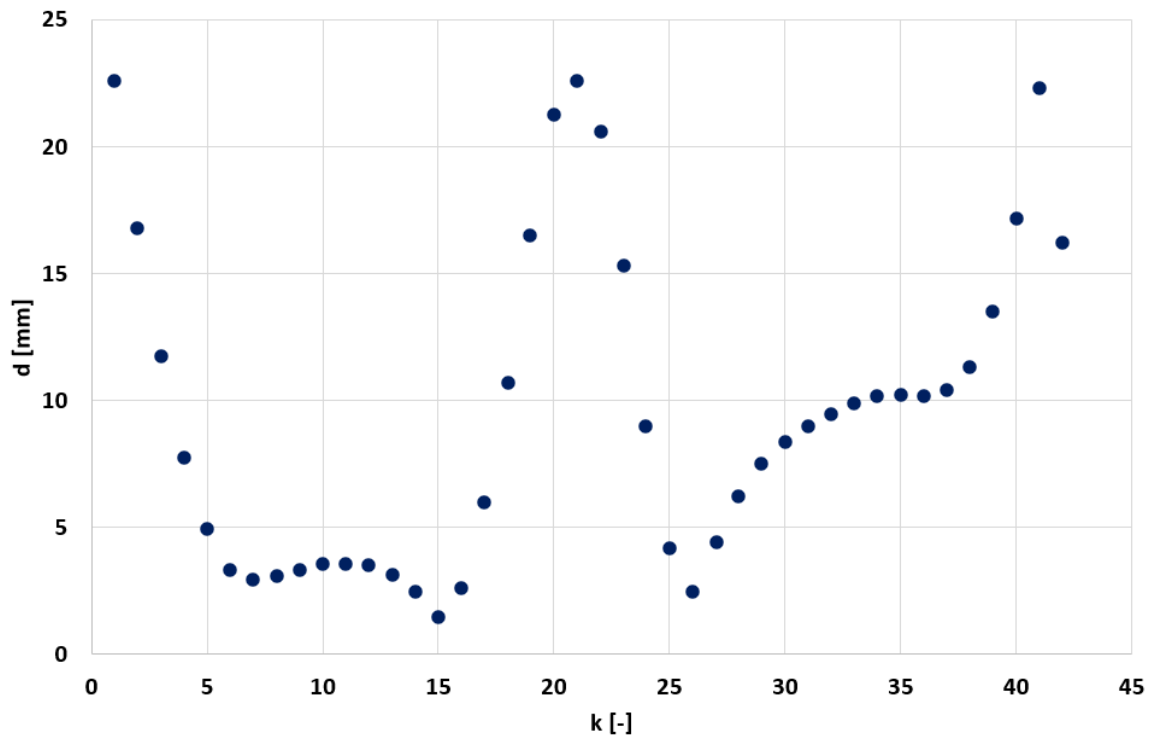
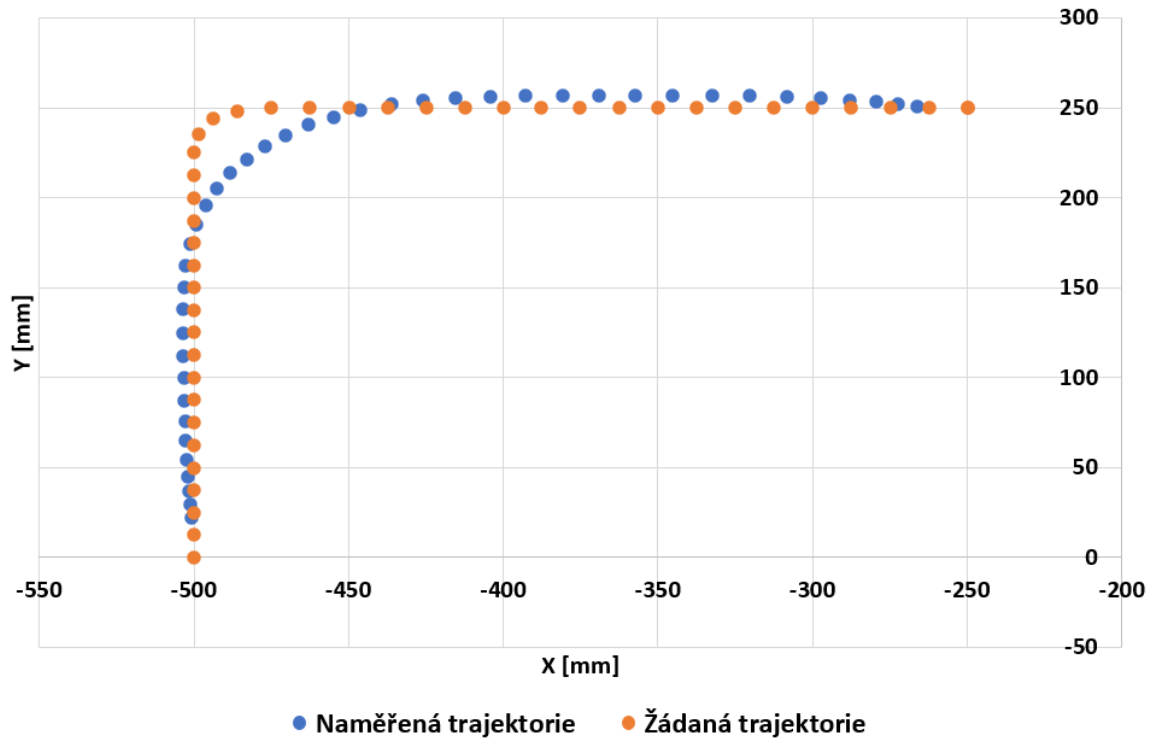
```

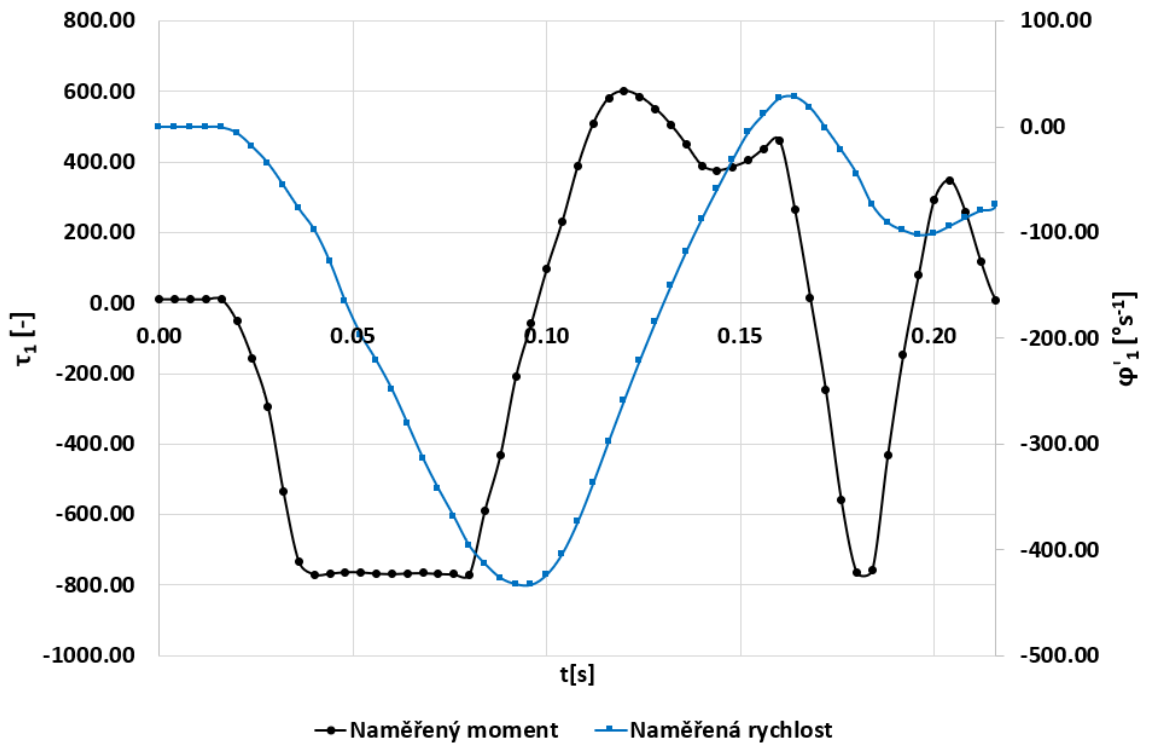
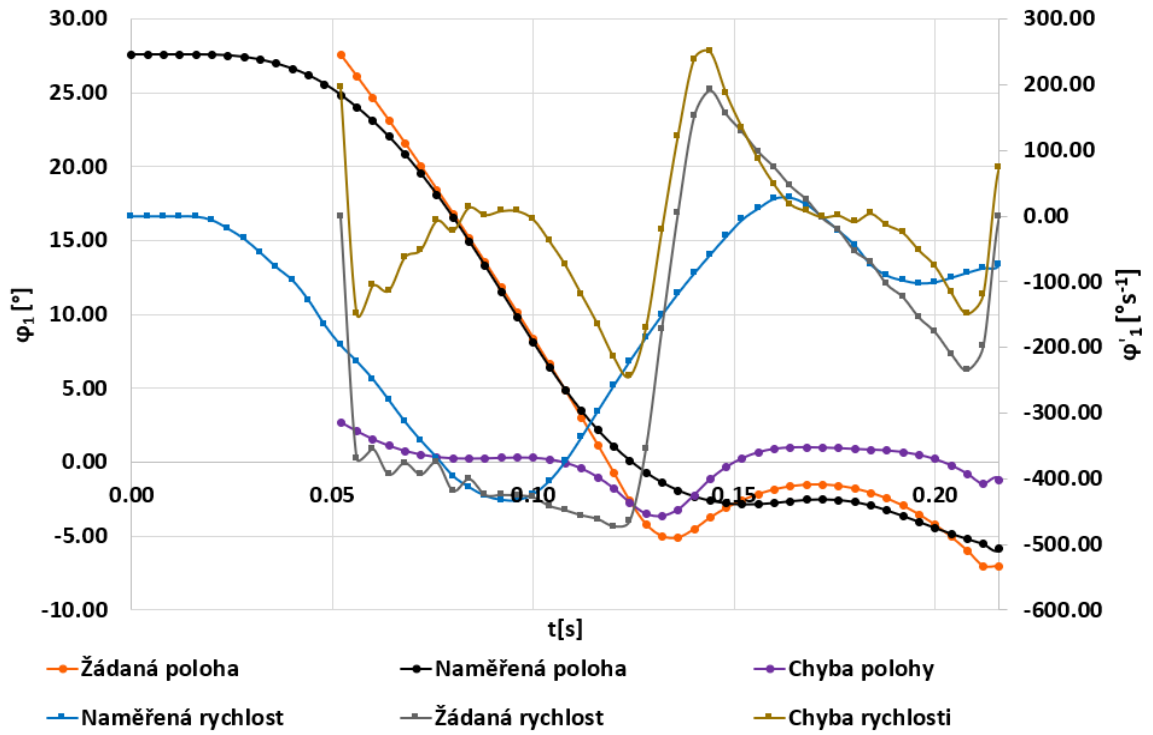
G = [G1; G2];
end

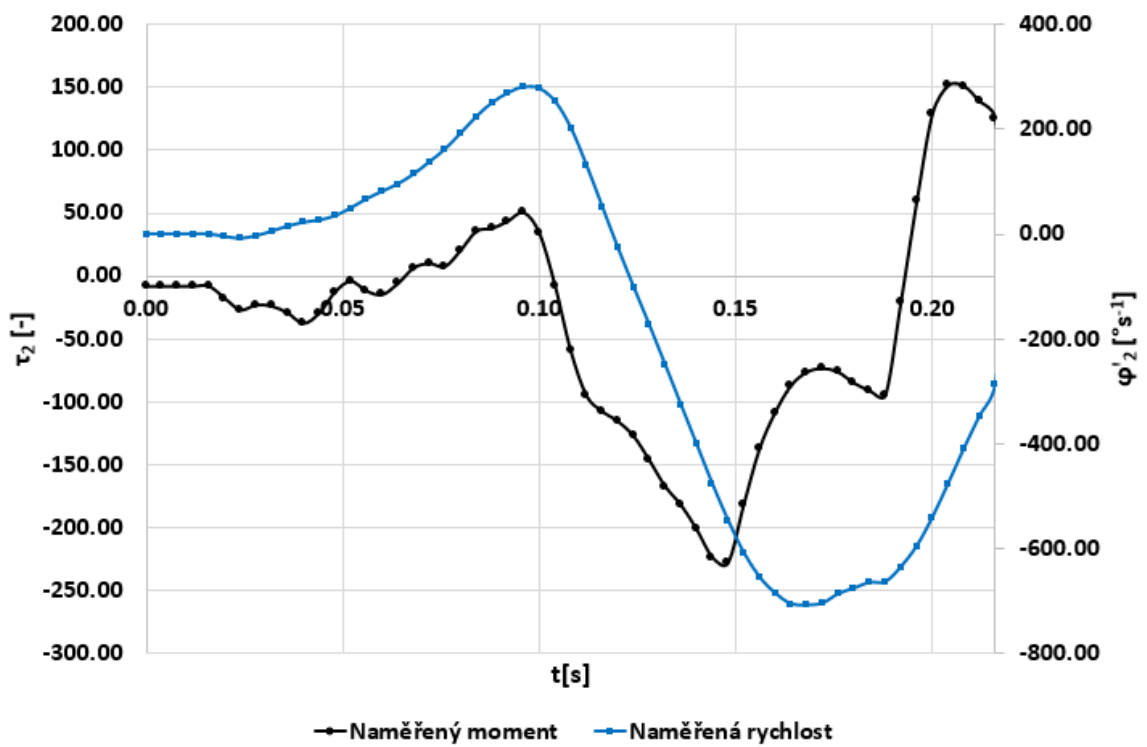
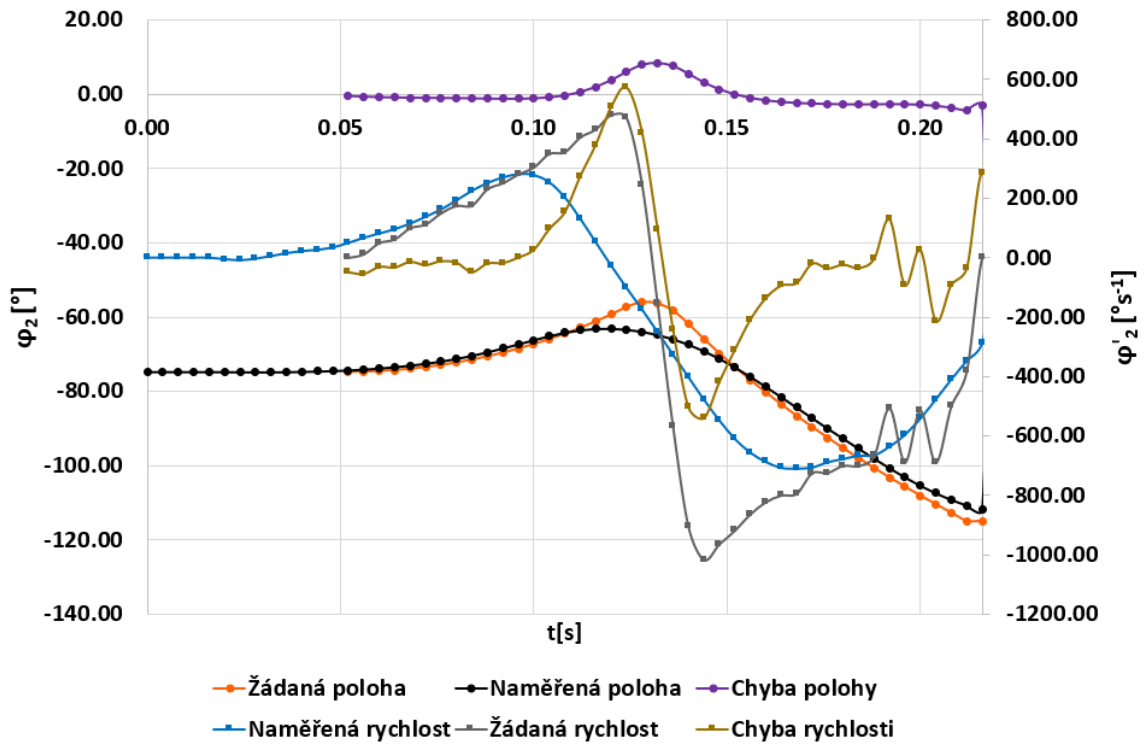
function [ Ip ] = MaticePseudoSetrvacnosti( I, r, m)
Ip = [(-I(1,1)+I(2,2)+I(3,3))/2 -I(1,2) -I(1,3)
m*r(1);...
-I(2,1) (I(1,1)-I(2,2)+I(3,3))/2 -I(2,3)
m*r(2);...
-I(3,1) -I(3,2) (I(1,1)+I(2,2)-
I(3,3))/2 m*r(3);...
m*r(1) m*r(2) m*r(3)
m];
end

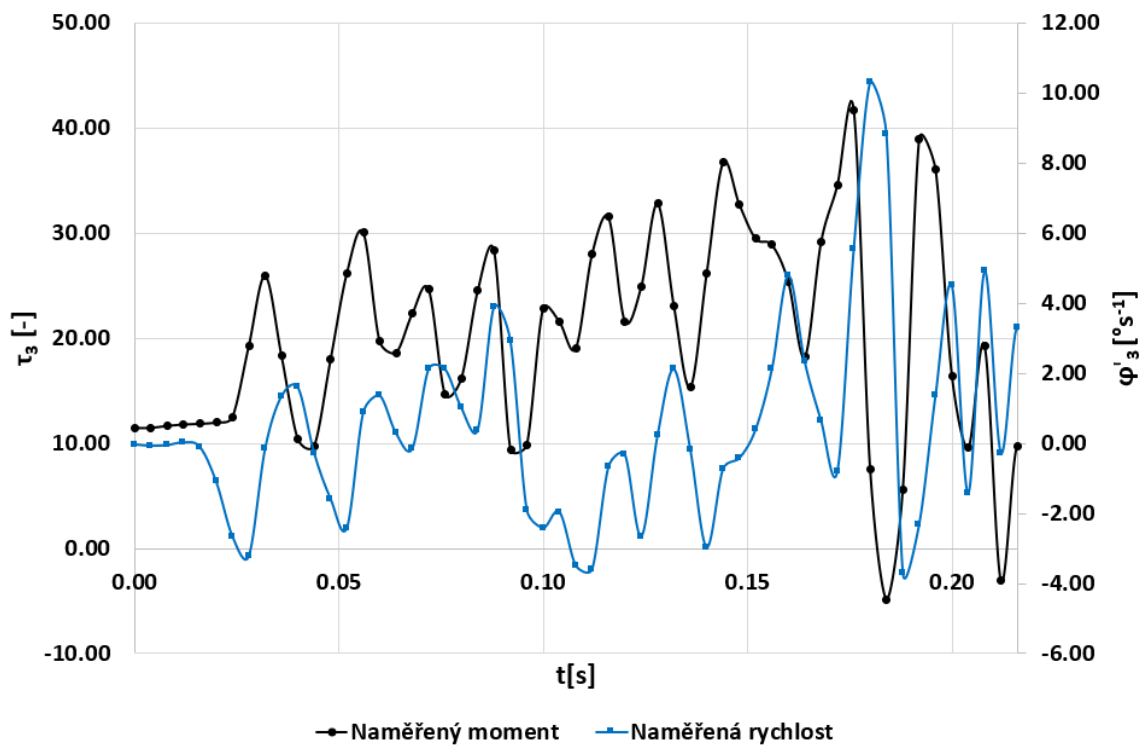
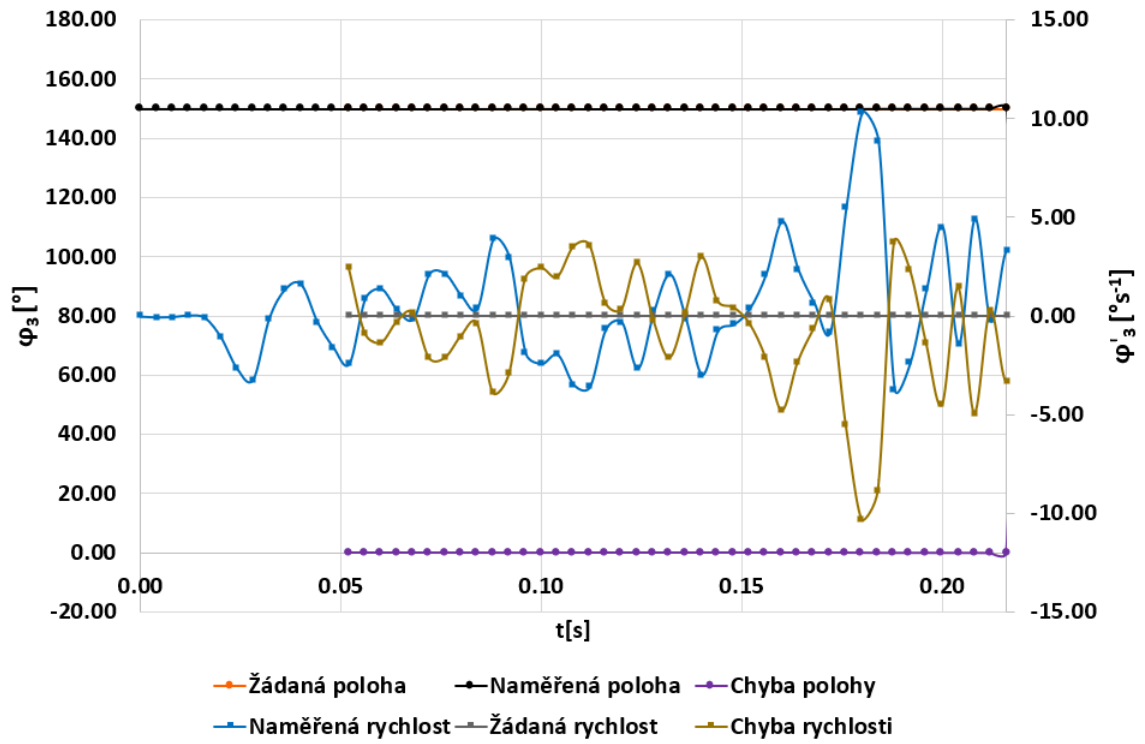
```

PŘÍLOHA P IV: VYHODNOCENÍ ROHU S 20% PROLOŽENÍM

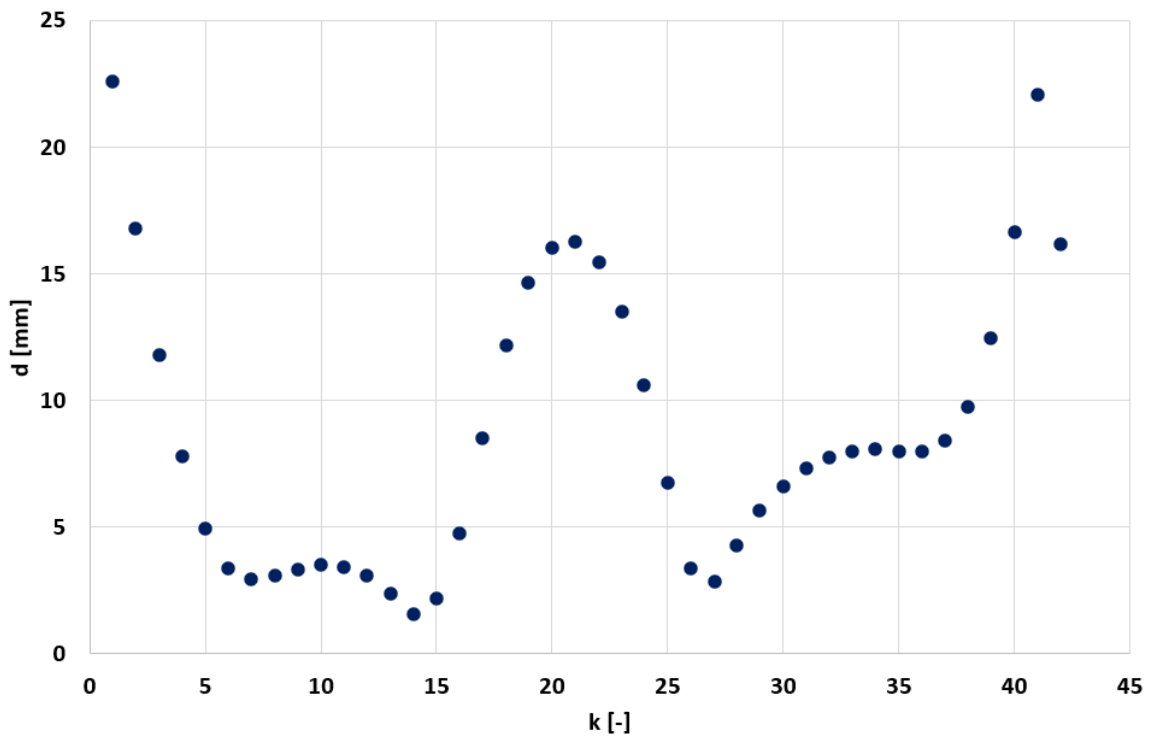
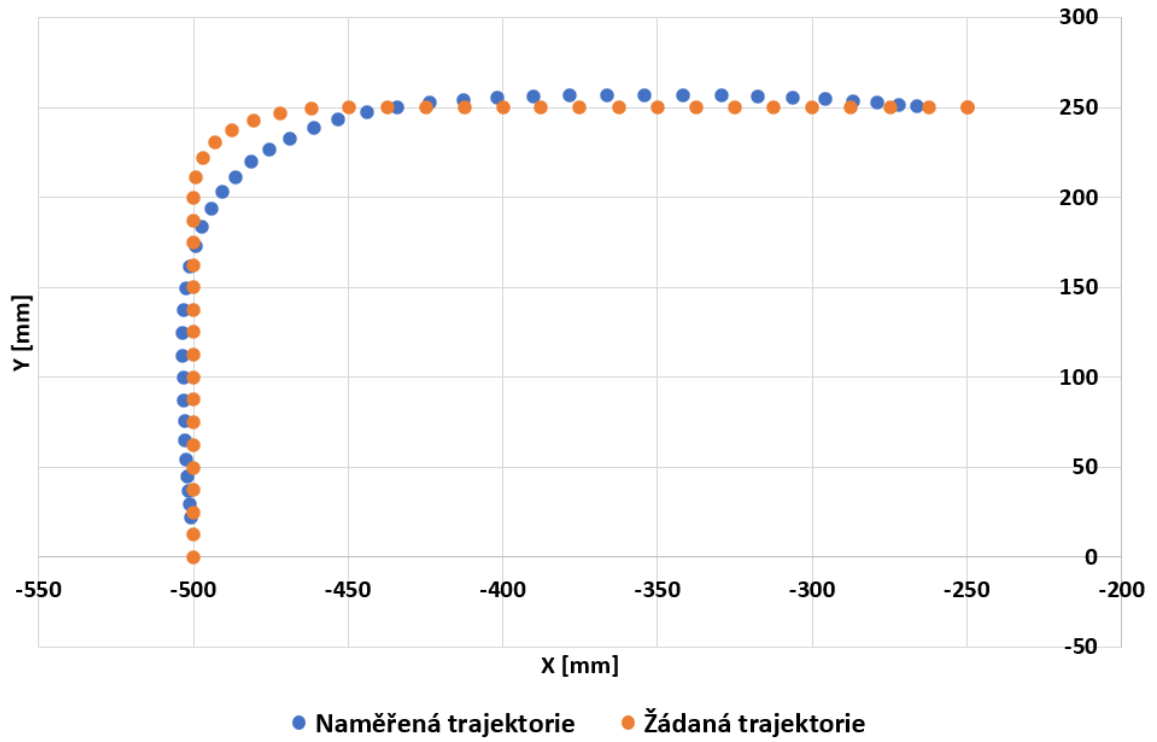


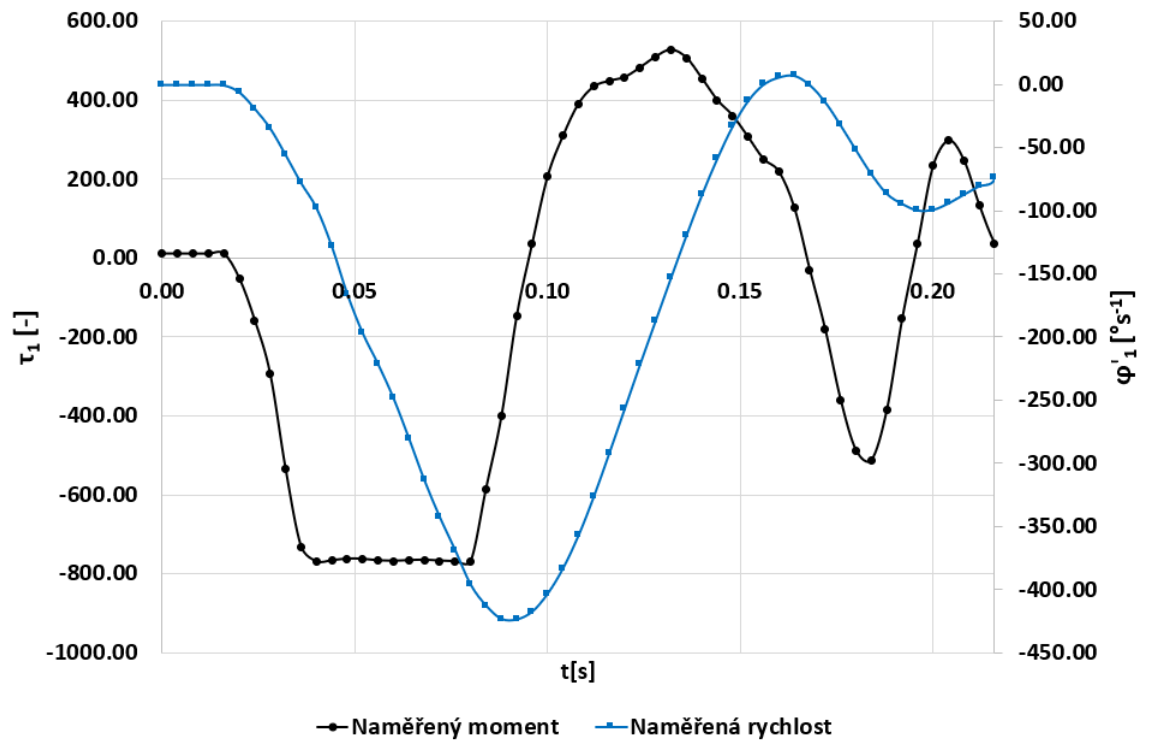
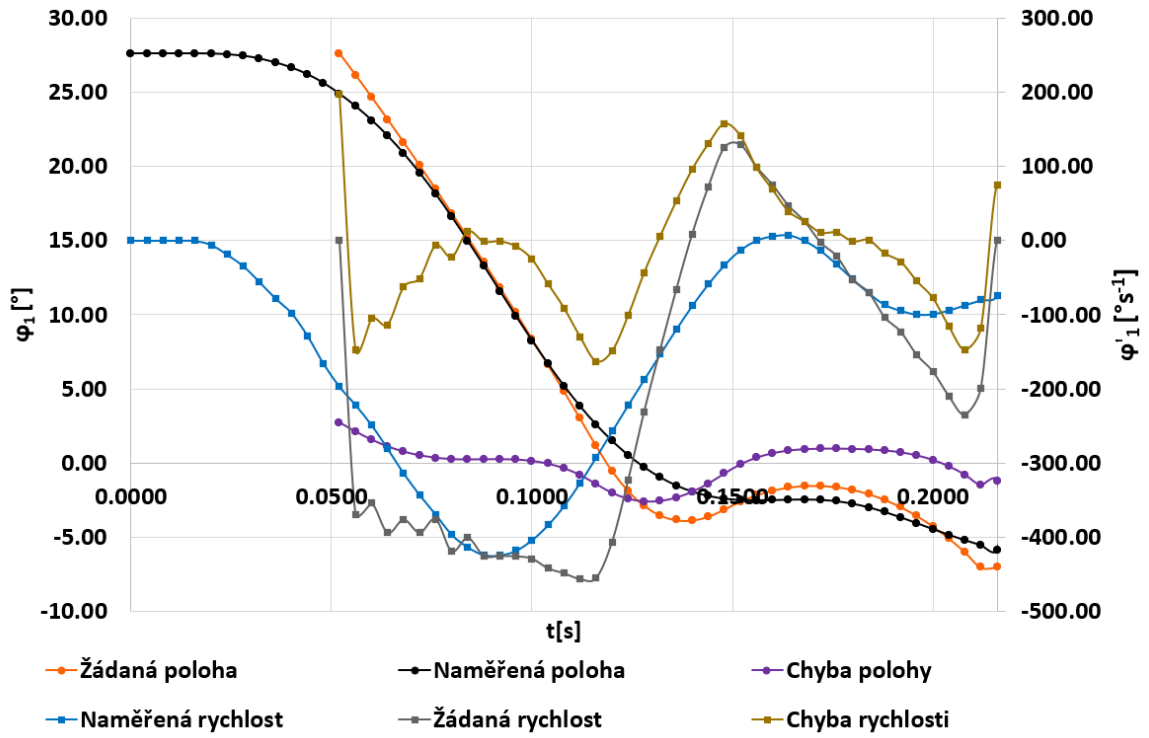


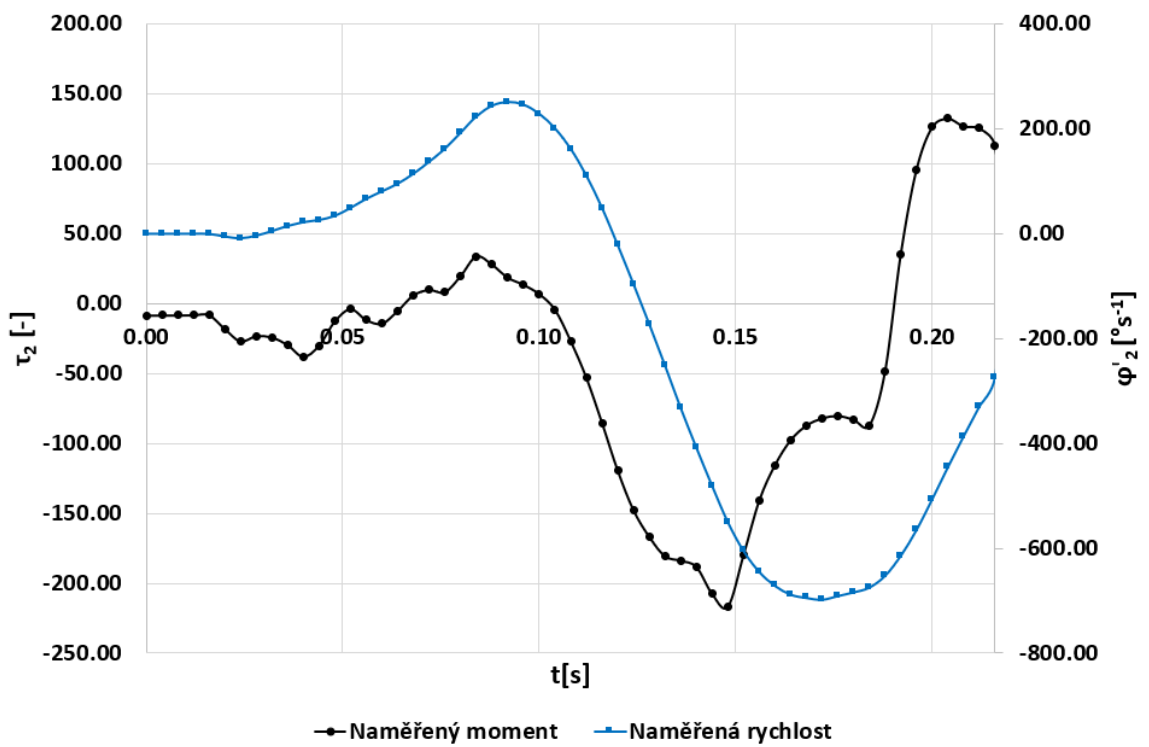
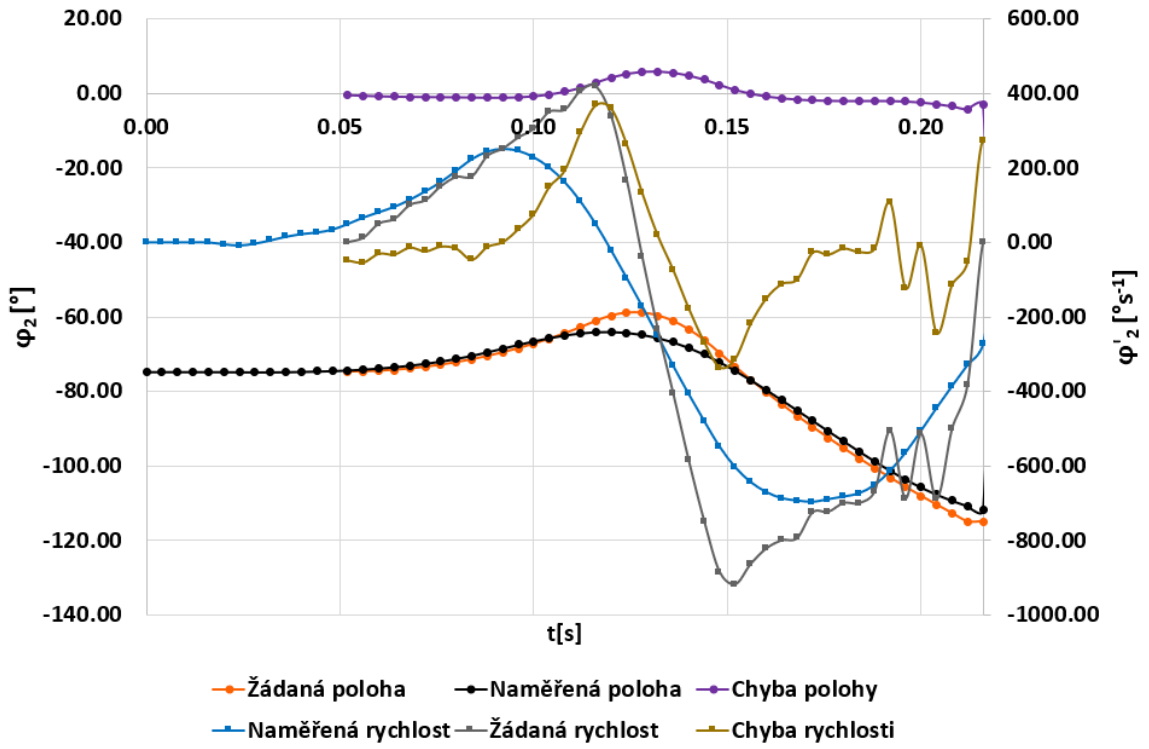


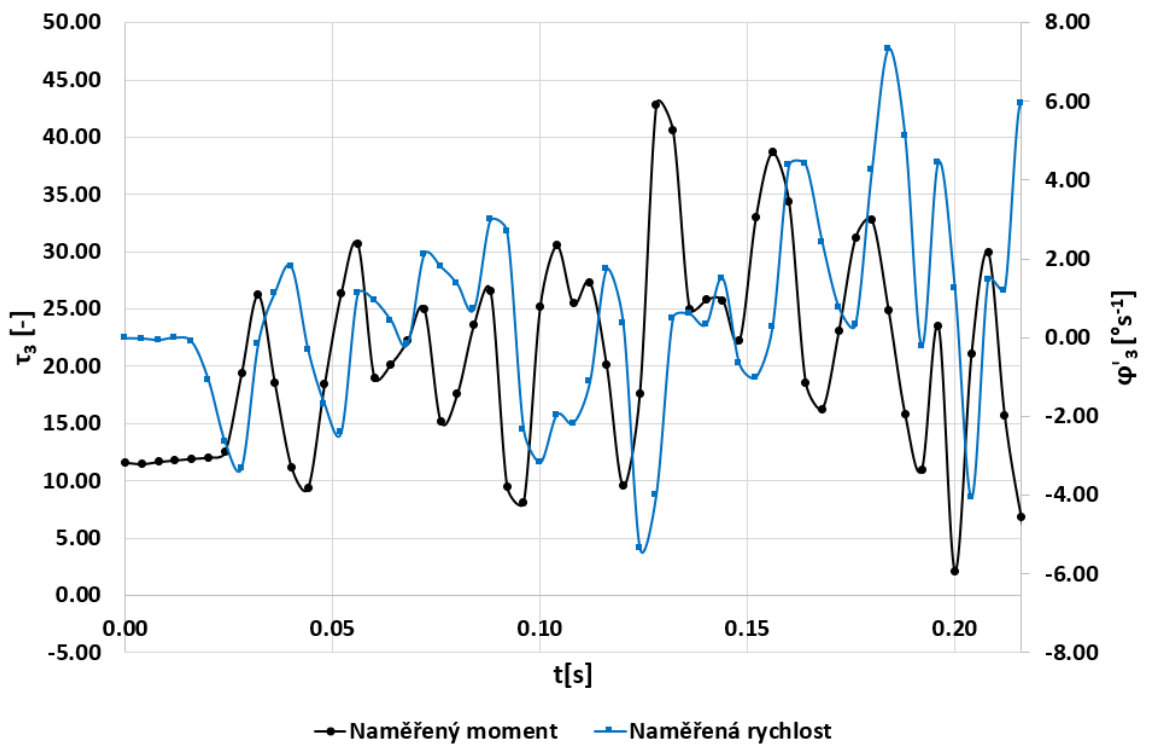
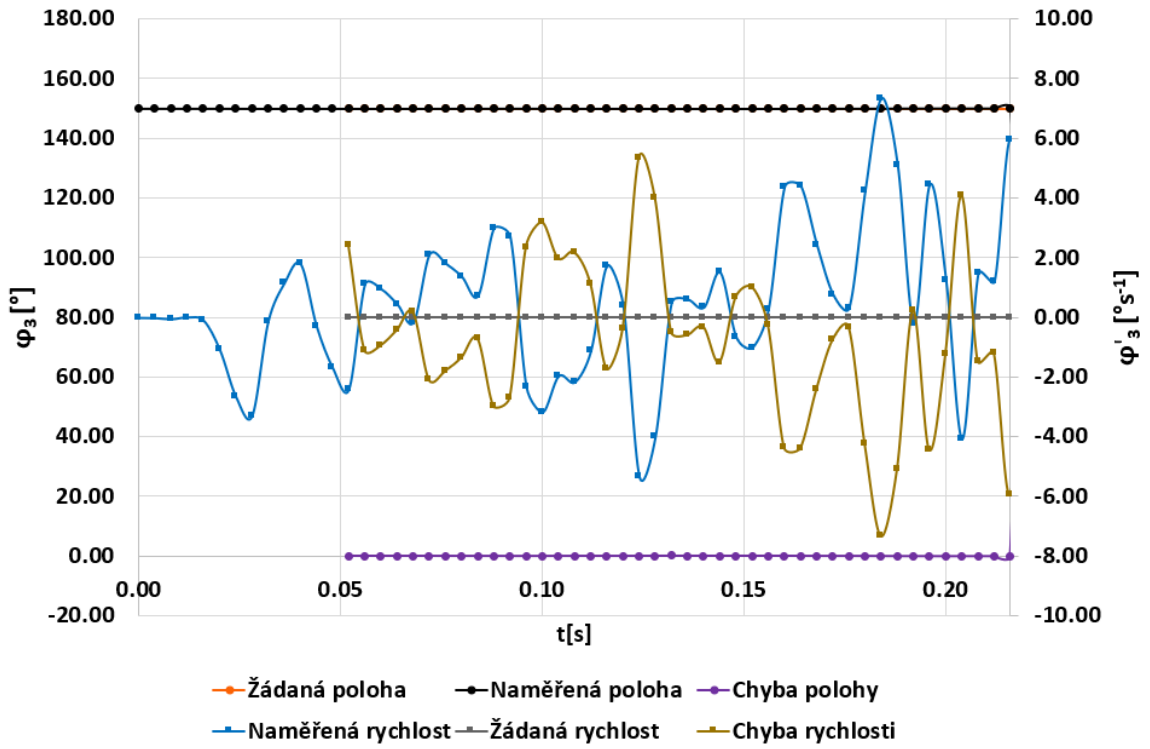


PŘÍLOHA P V: VYHODNOCENÍ ROHU S 40% PROLOŽENÍM

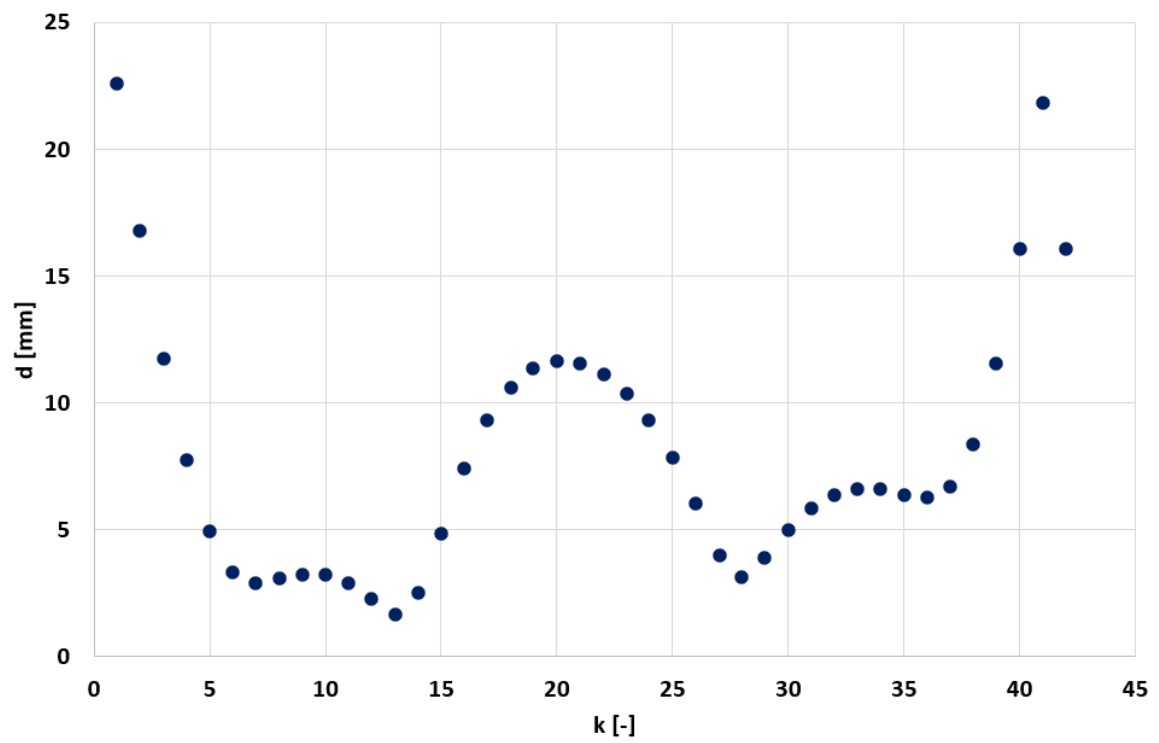
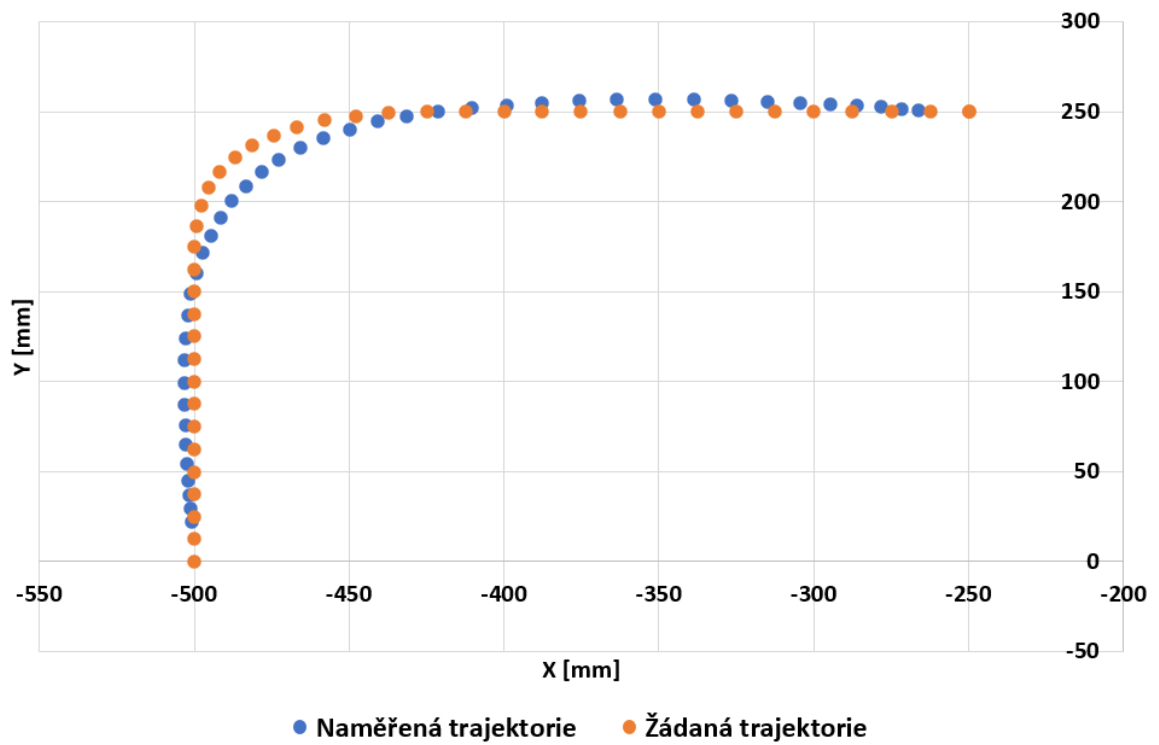


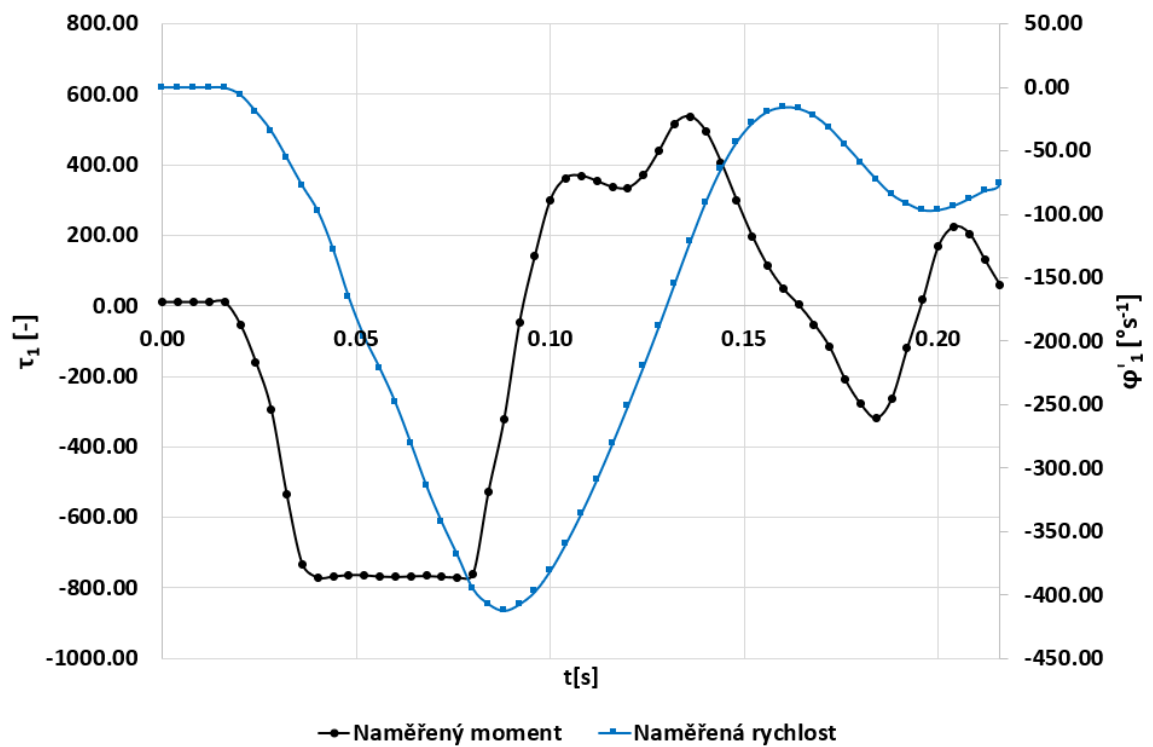
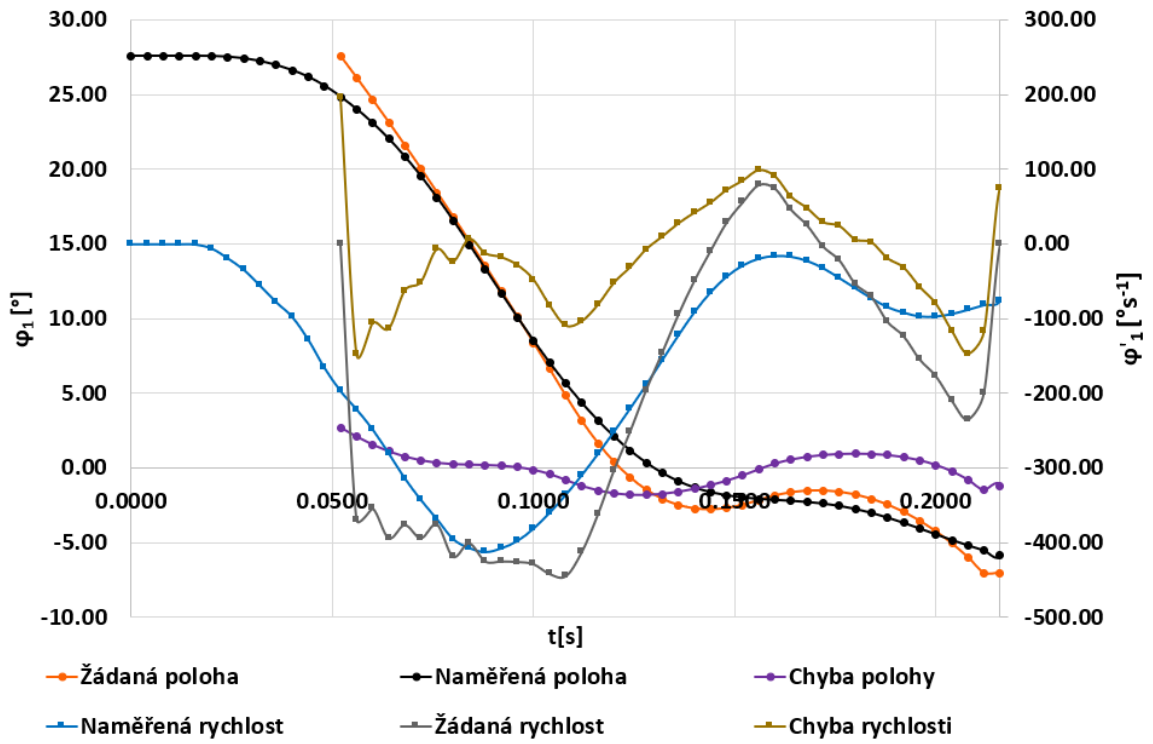


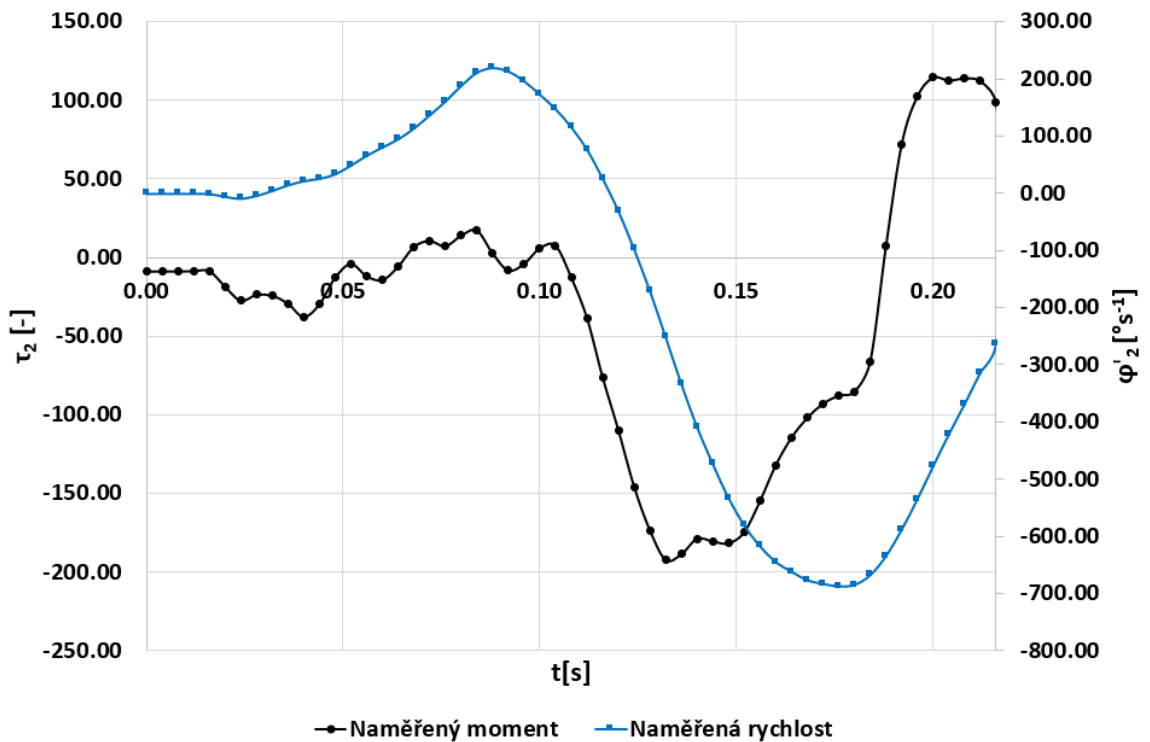
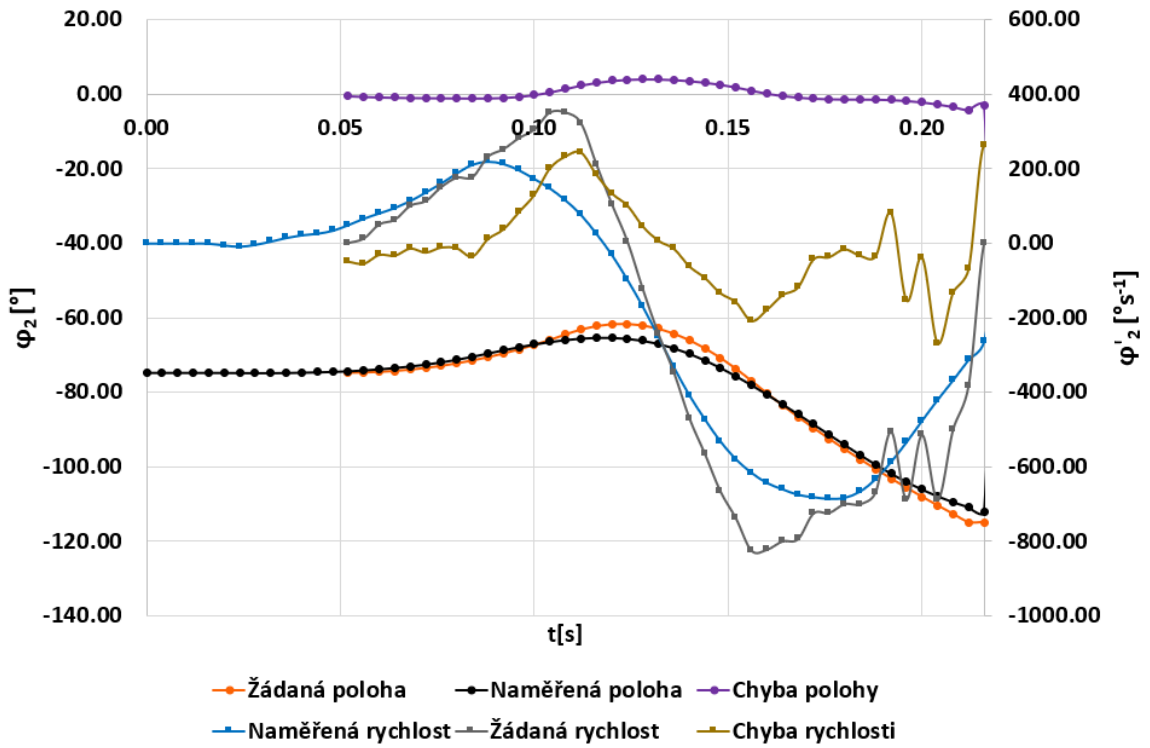


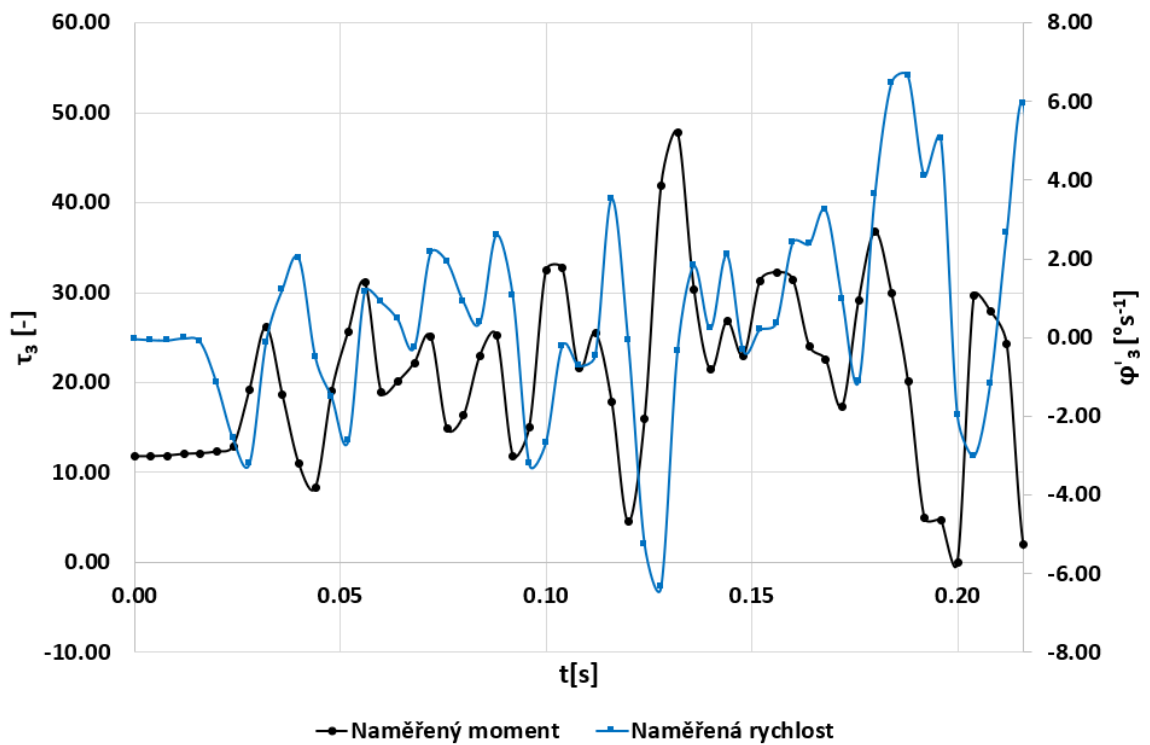
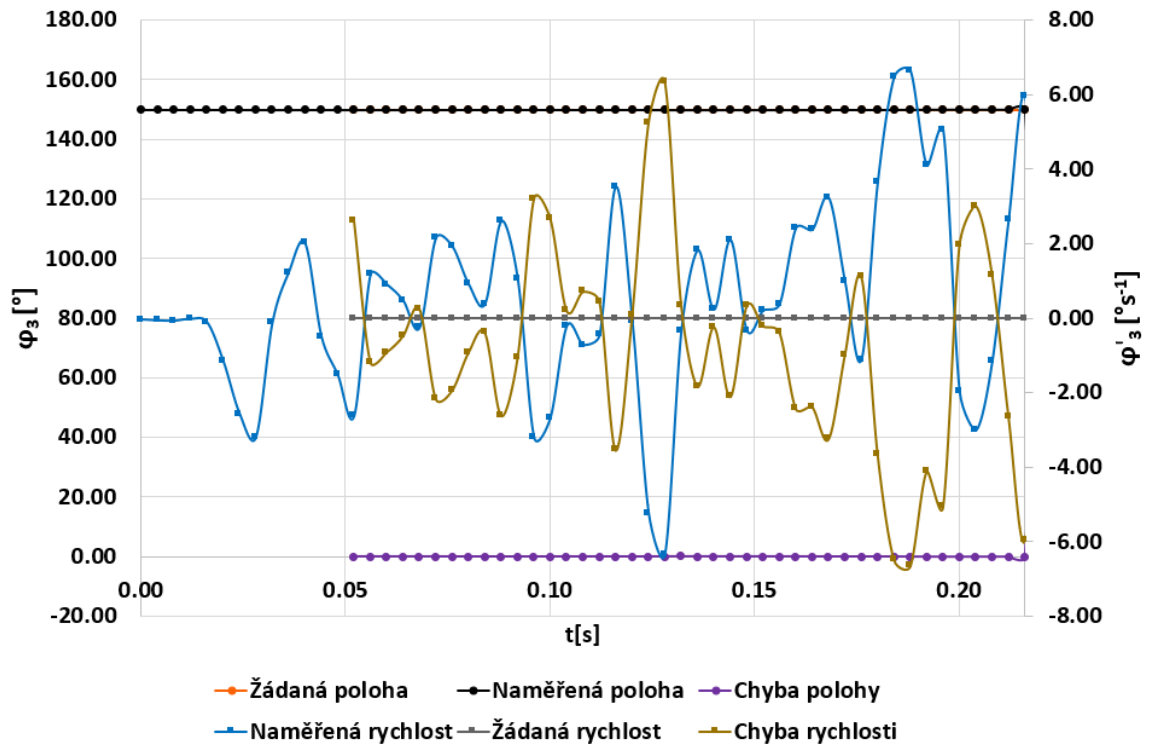


PŘÍLOHA P VI: VYHODNOCENÍ ROHU S 60% PROLOŽENÍM

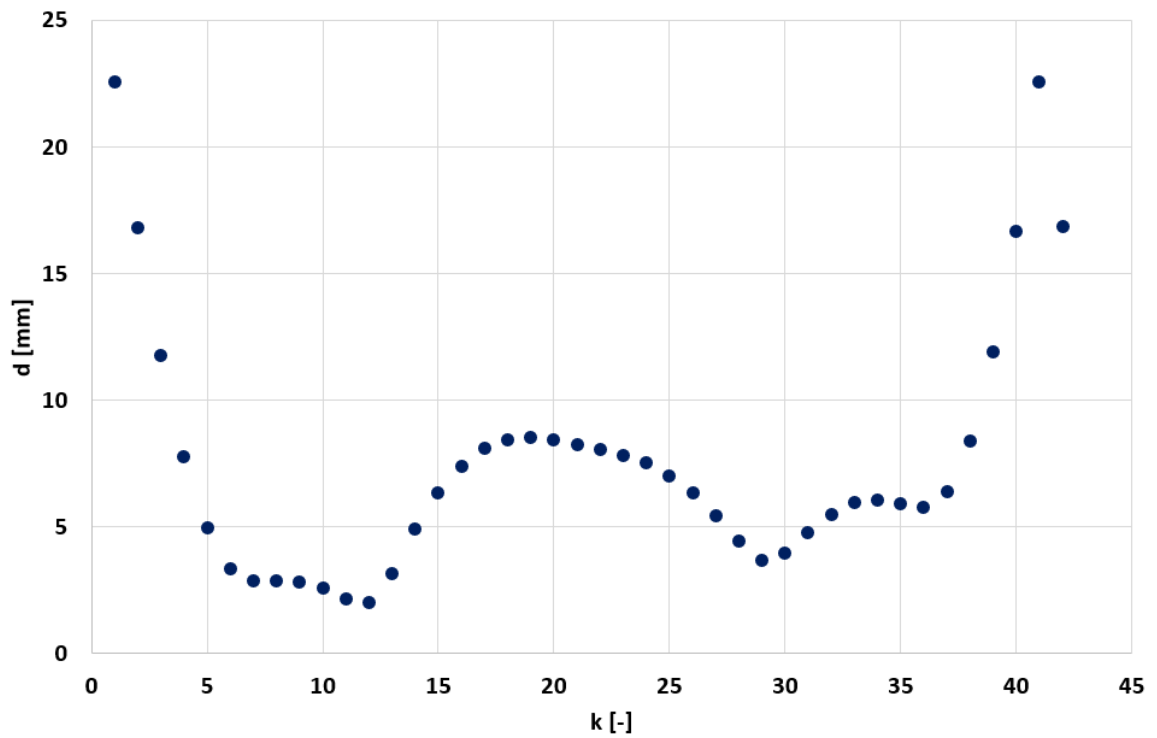
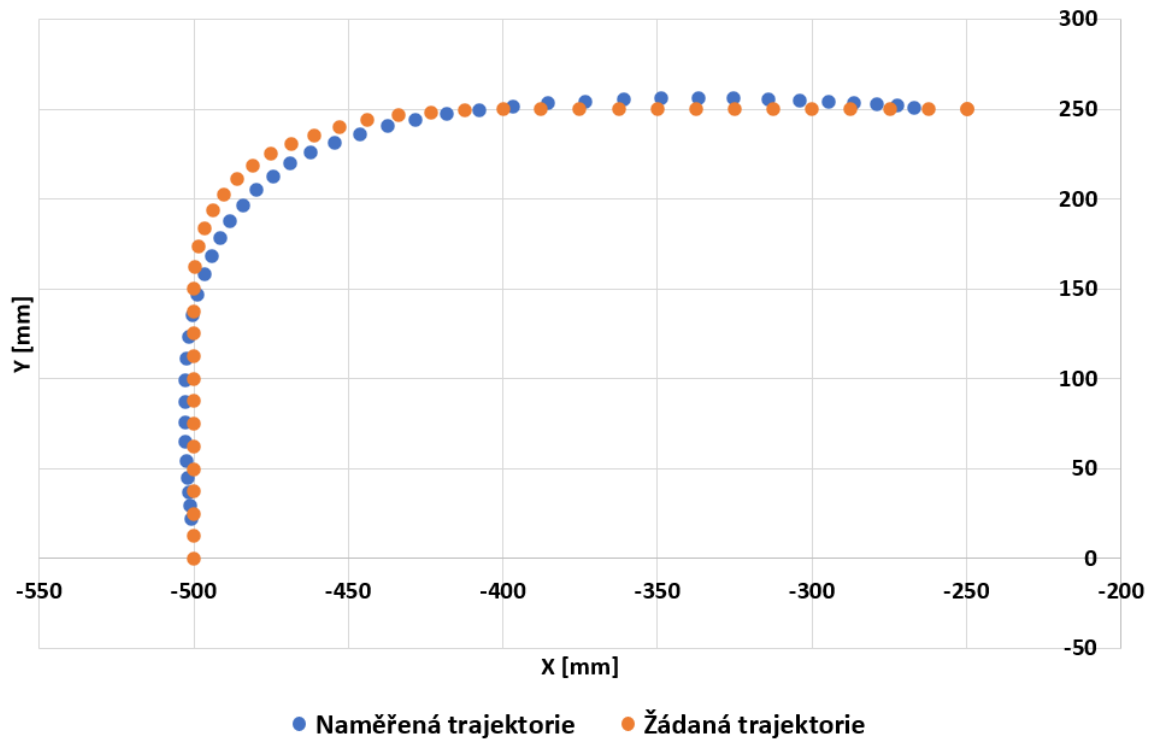


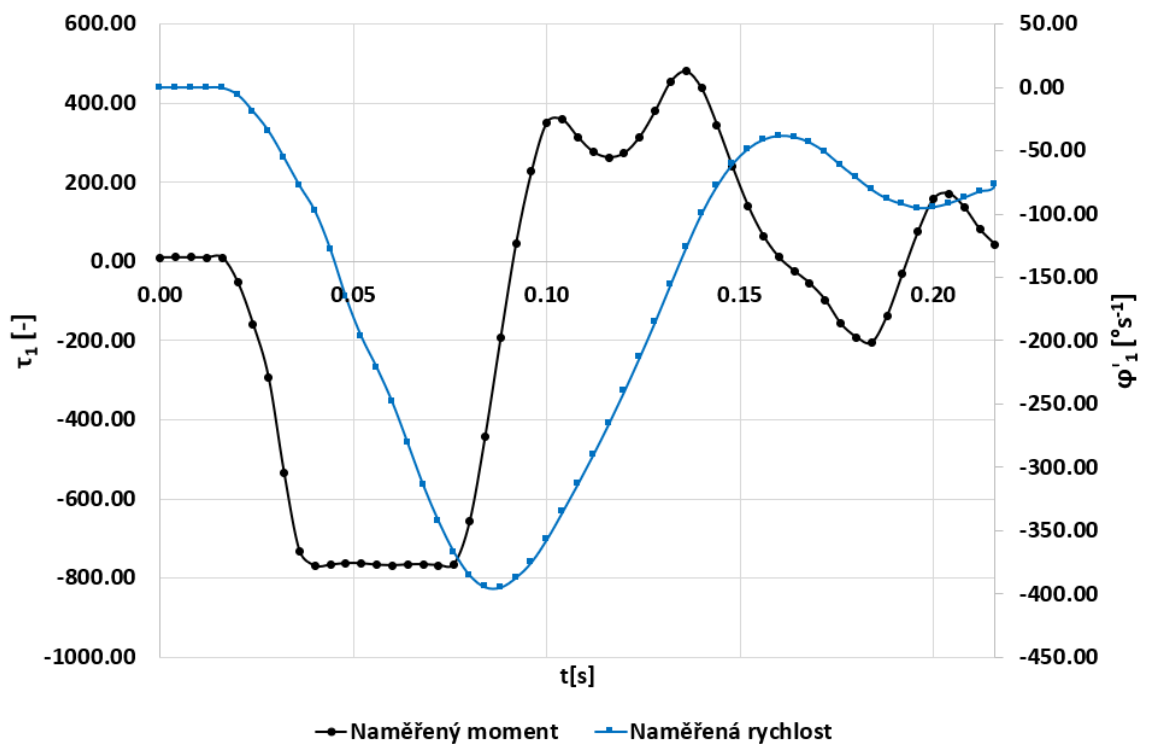
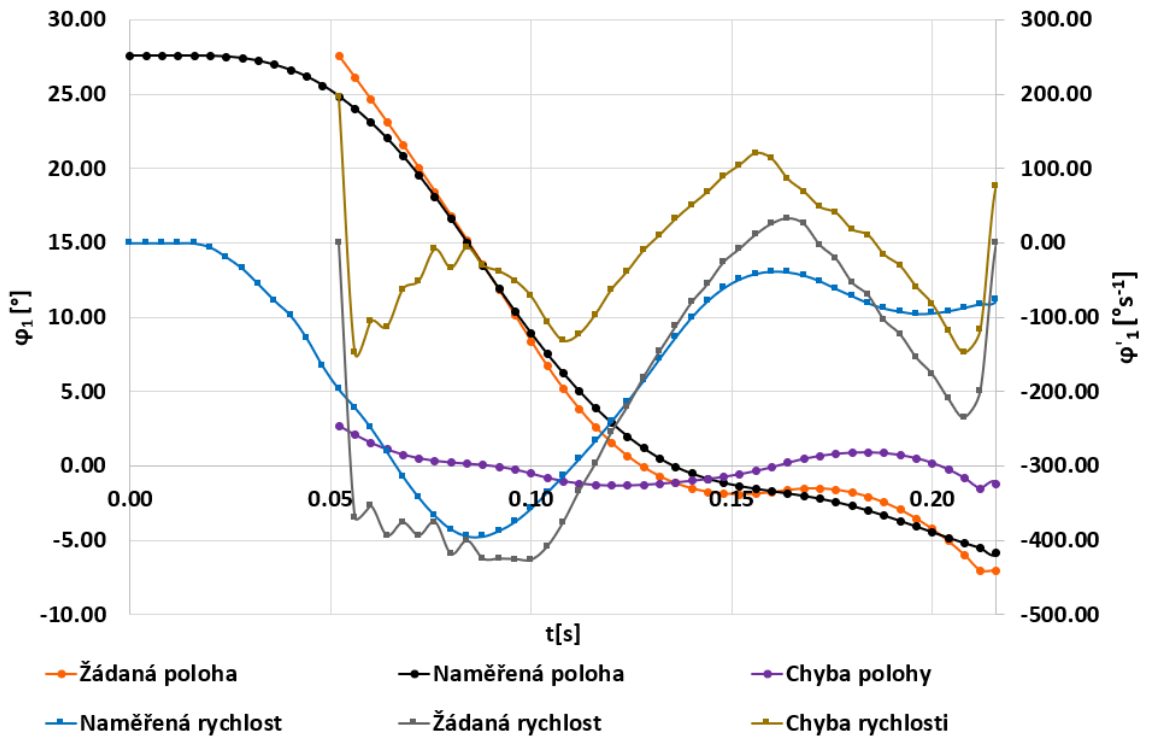


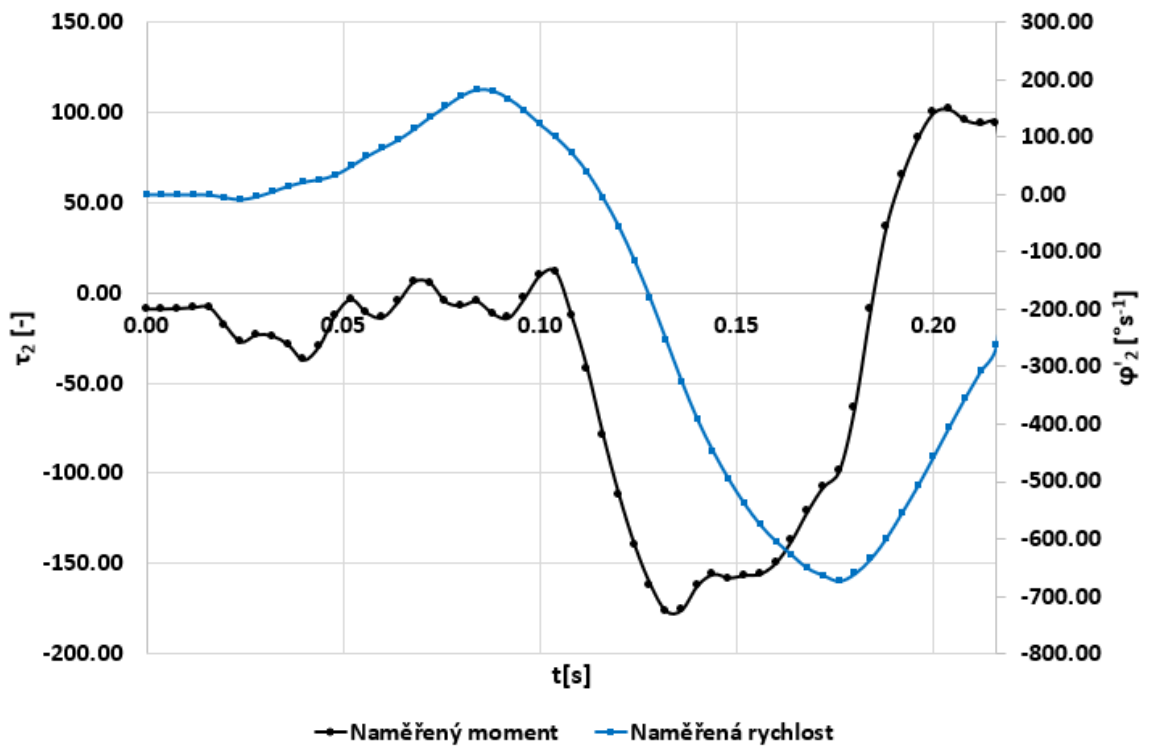
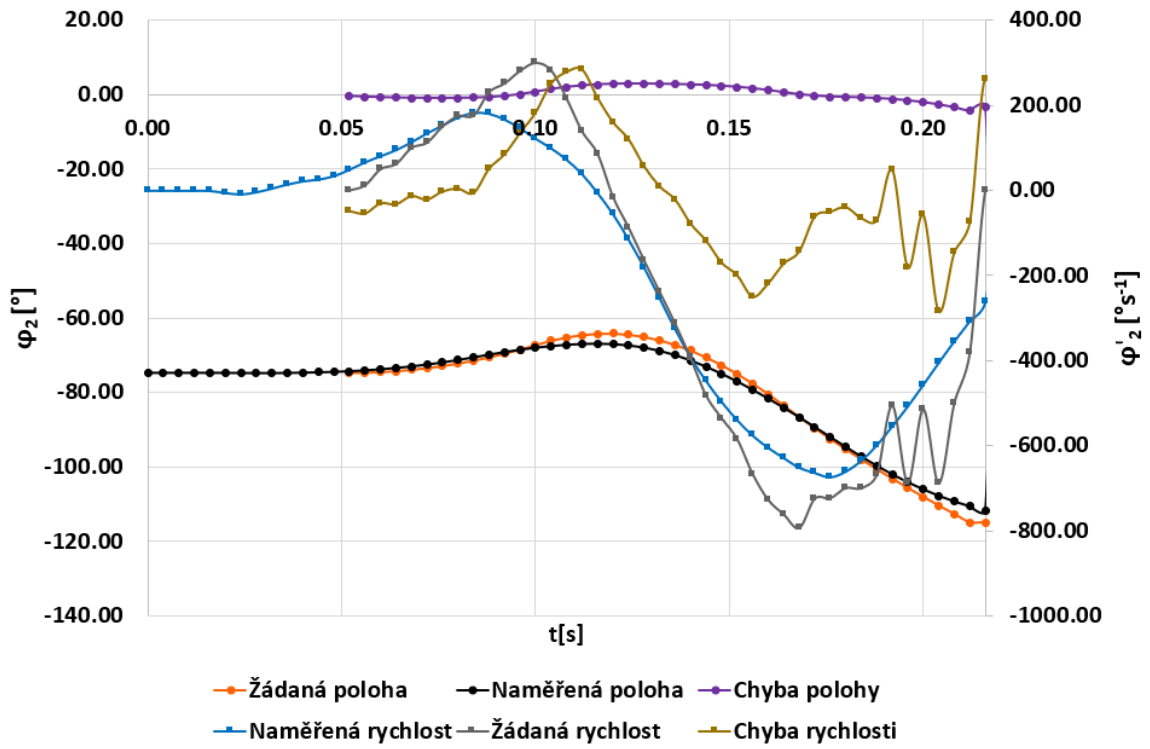


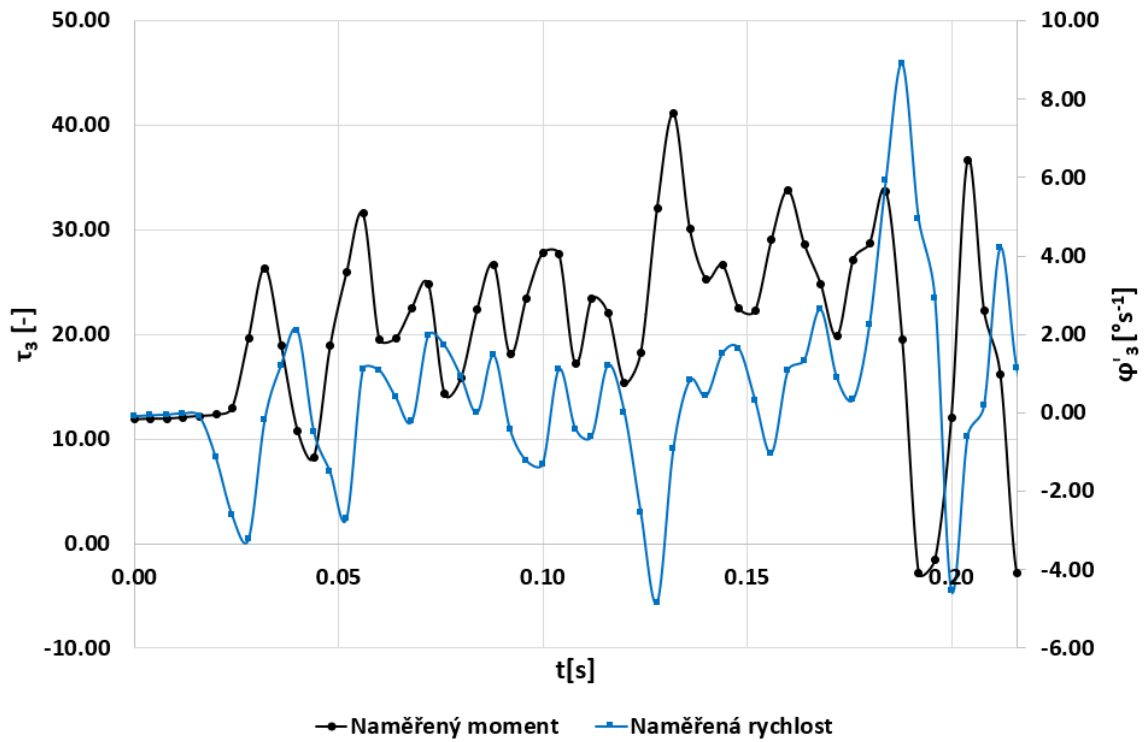
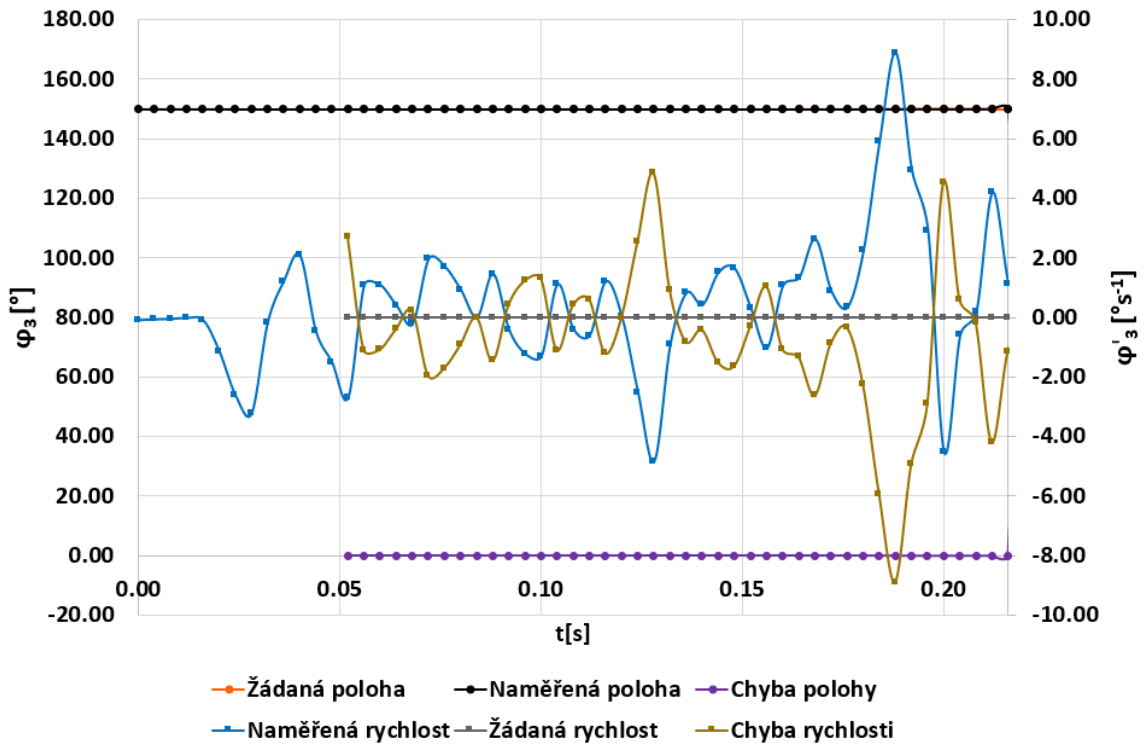


PŘÍLOHA P VII: VYHODNOCENÍ ROHU S 80% PROLOŽENÍM

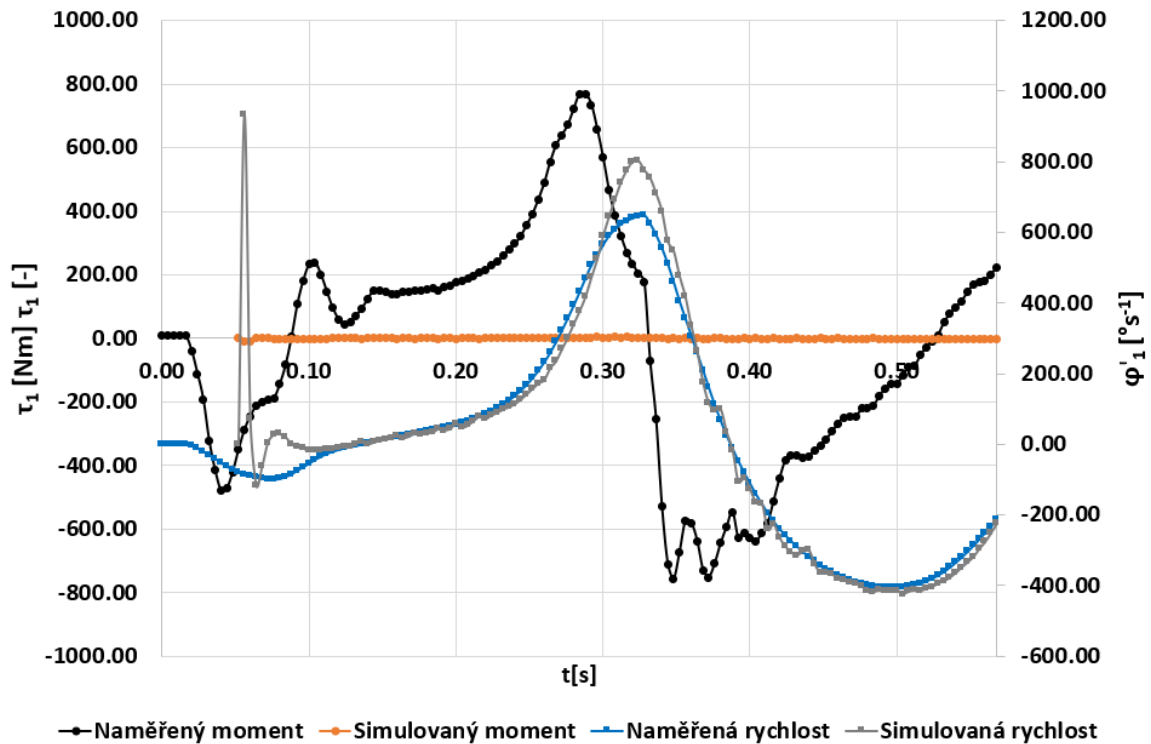
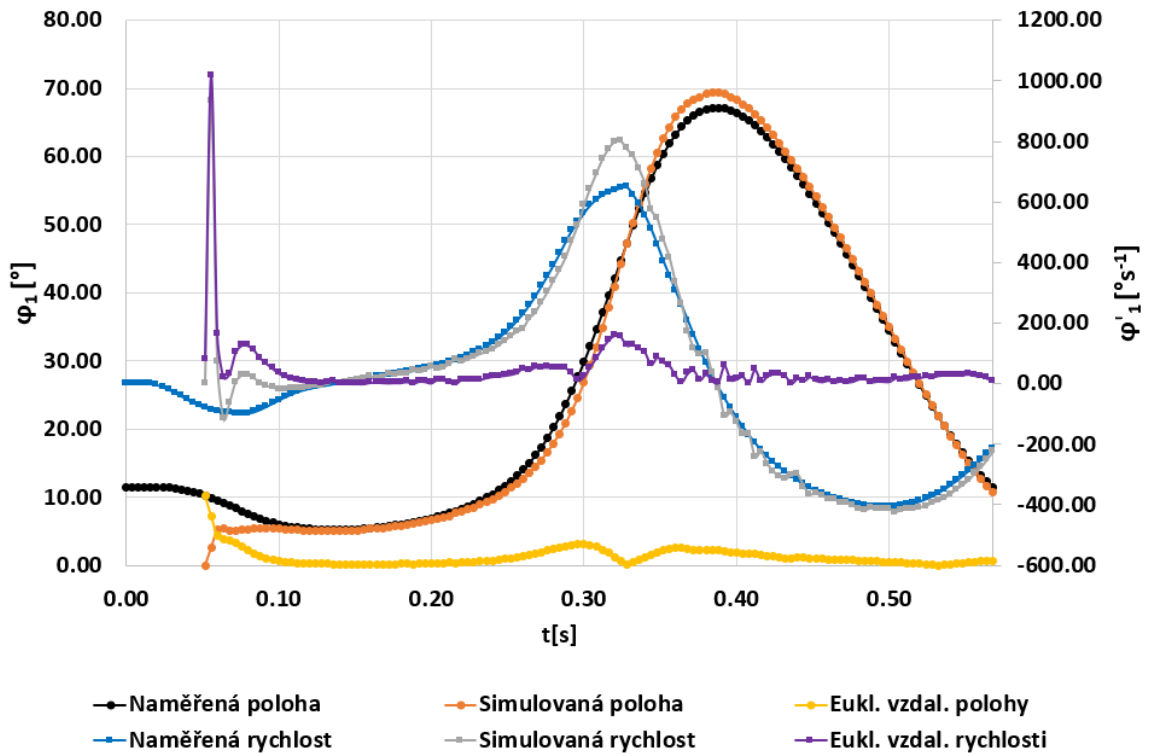


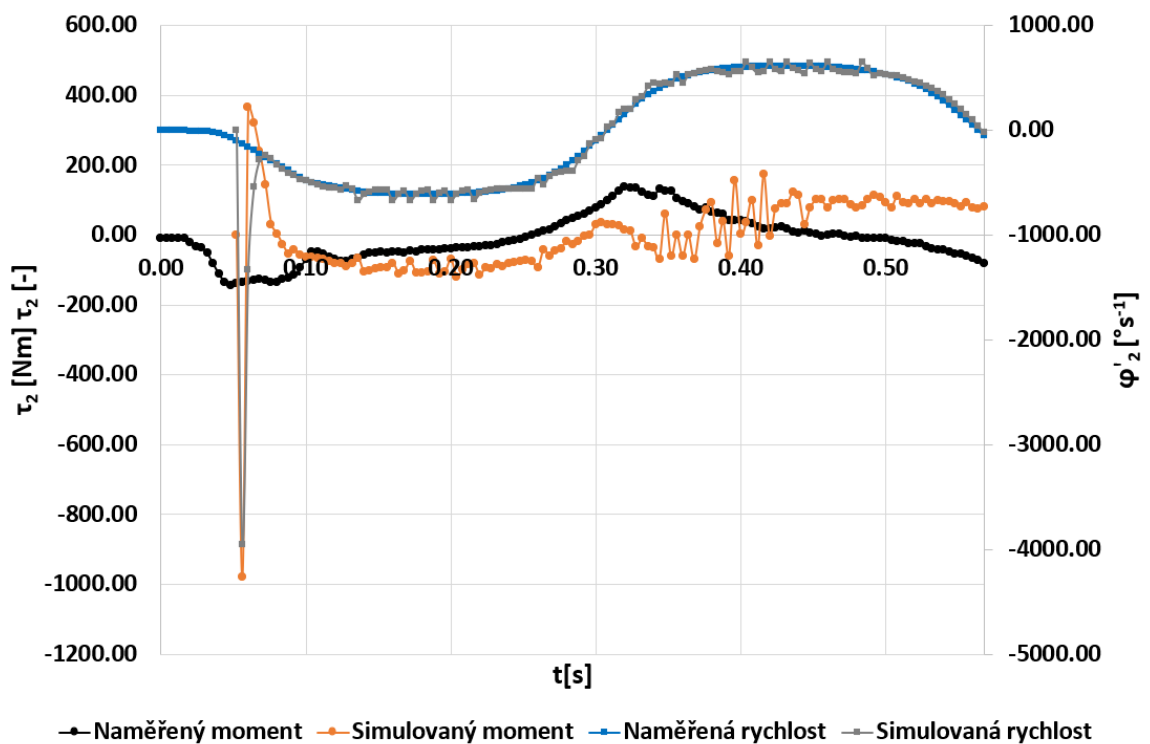
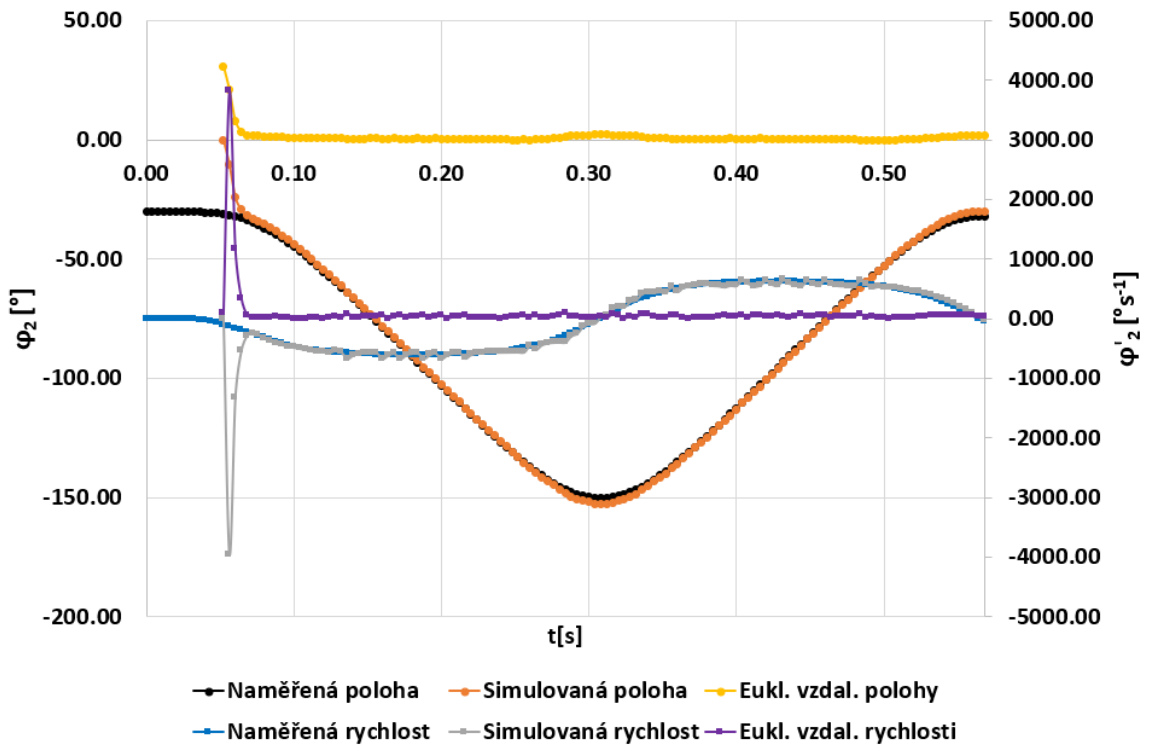




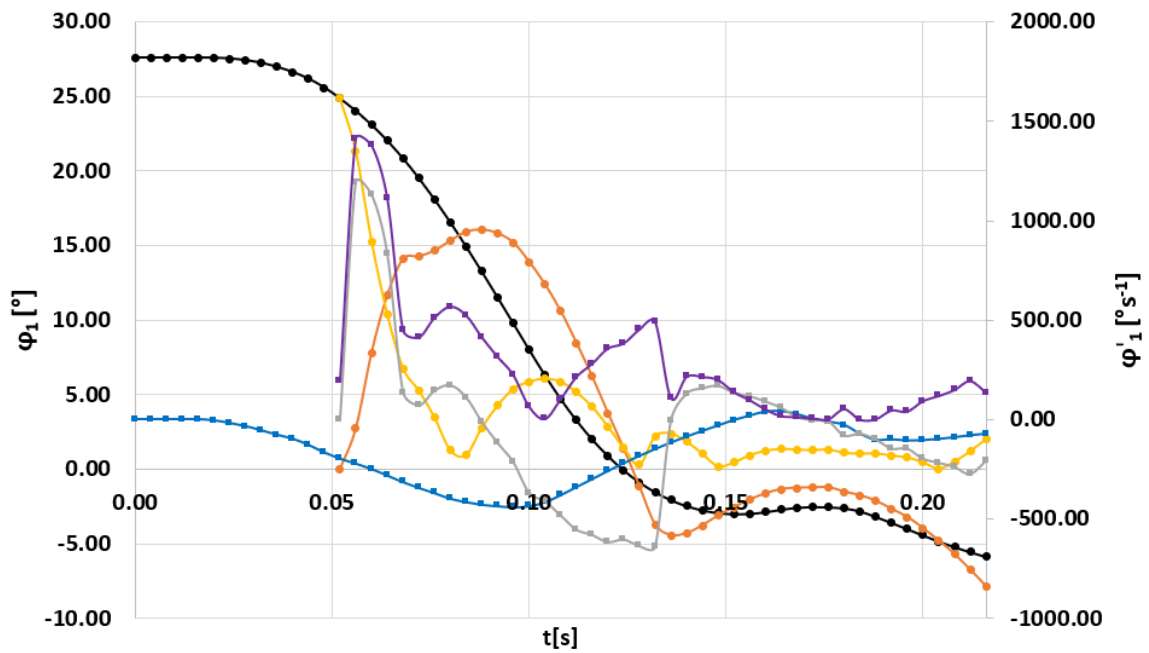


PŘÍLOHA P VIII: VYHODNOCENÍ SIMULACE A MĚŘENÍ KRUHU

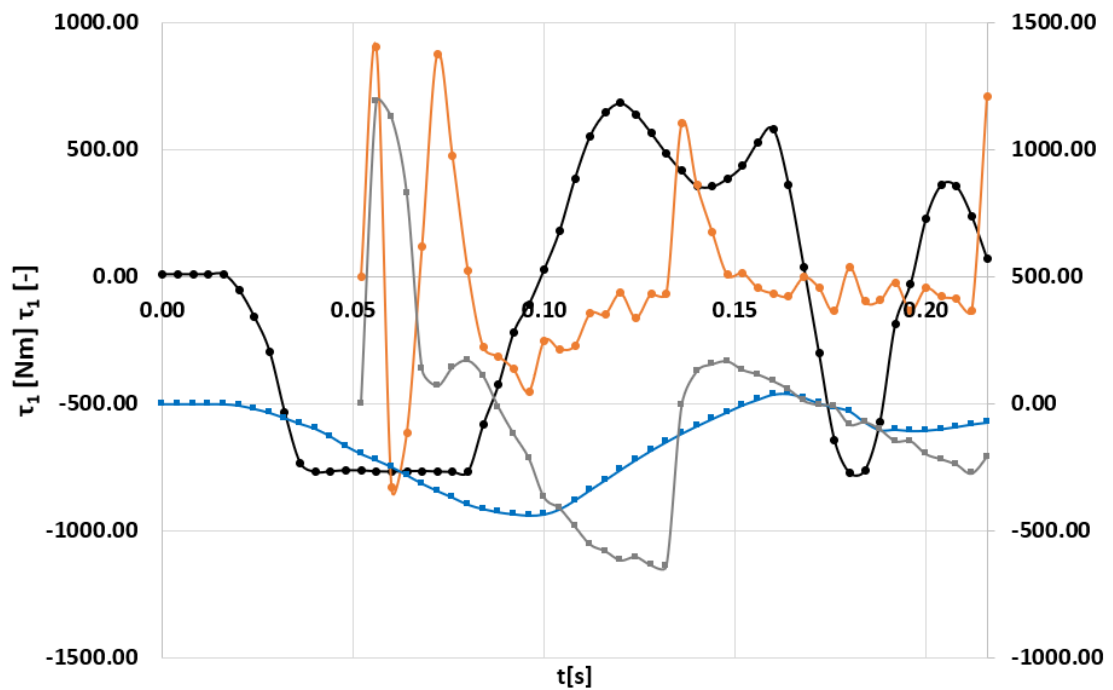




PŘÍLOHA P IX: VYHODNOCENÍ SIMULACE A MĚŘENÍ ROHU



- Naměřená poloha
- Simulovaná poloha
- Eukl. vzdal. polohy
- Naměřená rychlost
- Simulovaná rychlost
- Eukl. vzdal. rychlosti



- Naměřený moment
- Simulovaný moment
- Naměřená rychlost
- Simulovaná rychlost

