Diplomová práce

České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Identifikace 6-osého průmyslového robotu

Bc. Andrej Suslov

Vedoucí práce: Ing. Martin Ron
Květen 2017

Poděkování

bla bla bla

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 24. května 2017

Abstrakt

text abstraktu cesky

Klíčová slova: robot, identifikace, průmysl, energie, spotřeba, databáze

Vedoucí práce: Ing. Martin Ron

Abstract

Text abstraktu anglicky

Keywords: robot, identification, industry, energy, consumption, database

Title translation: Identification of a 6-axis industrial robot

Obsah

Obrázky

Tabulky

Kapitola 1

Úvod

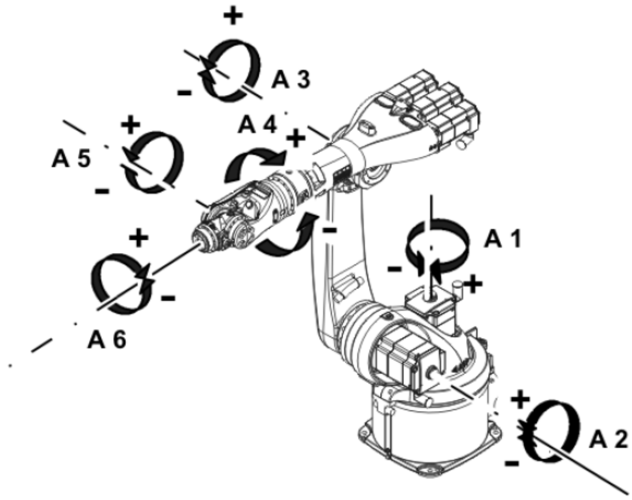
Kapitola 2

Robotický systém

Identifikace byla provedena na průmyslovém robotu KUKA KR5 Arc [**?**] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osového robota, který má 6 rotačních os poháněných servomotory. Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Konfigurace os robota je zobrazena na obrázku 2.2.

Obrázek 2.1: Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [**?**].

Tento robot s hmotností 127 kg a základní nosností 5 kg patří mezi lehčí průmyslové roboty. Byl vyvinut primárně pro aplikace vyžadující vysokou přesnost polohování, jako je obloukové svařování a přesná manipulace s lehkými pevnými předměty. Je určen pro montáž na zem nebo strop ve vnitřních prostorách.



Obrázek 2.2: Konfigurace os robota. Převzato z [?].

Jako pohony os jsou použity třífázové synchronní servopohony s permanentními magnety (PMSM). Pro zvýšení točivého momentu motorů a přesnosti polohování jsou motory opatřeny převodovkou.

Součástí robota je i řídící systém zajišťující napájení a řízení robota a poskytující uživatelské rozhraní (HMI) pro jeho programování a ovládání. Pohyb robota je programován v jazyce KRL (KUKA Robot Language). Součástí řídícího systému je i užitečný nástroj TRACE, umožňující sledování vnitřních stavů robota jako jsou polohy, rychlosti a zrychlení jednotlivých os, jejich momenty, protékající proudy a mnoho dalších.

Celý systém je napájen z třífázové soustavy elektrické energie. Podrobnější informace je možné nalézt v katalogovém listu. [?].

Kapitola 3

Dynamický model

Pro výpočet a predikci spotřeby elektrické energie je potřeba vytvořit matematický dynamický model robota. V případě 6-ti osového manipulátoru se jedná o systém se šesti stupni volnosti. K popisu jeho dynamiky je proto potřeba 6 rovnic druhého řádu. Celkově se tedy jedná o systém dvanáctého řádu.

3.1 Pohybové rovnice

K odvození pohybových rovnic je možné použít jeden ze dvou základních přístupů a to Newton-Eulerovu metodu nebo Euler-Lagrangeovu metodu.

Newton-Eulerova metoda je založena na přístupu k systému jako k soustavě jednotlivých jeho částí a vyžaduje určení pohybových rovnic každé jednotlivé osy. Protože jsou jednotlivé osy vzájemně kinematicky propojeny, jsou i pohybové rovnice jednotlivých os závislé na pohybu ostatních os.

Euler-Lagrangeova metoda naopak přistupuje k systému jako k celku a je založena na určení Lagrangianu, který je definován jako rozdíl jeho celkové kinetické a potenciální energie. Dynamické rovnice systému se poté odvodí vypočtením Lagrangeových rovnic druhého druhu pro všechny stupně volnosti.

Oba přístupy nakonec vedou ke stejným rovnicím. Protože jsou jednotlivé polohy a dynamika systému popisovány pomocí úhlů na jednotlivých osách, jsou tyto rovnice silně nelineární. V případě robota KR5 se jedná o soustavu 6 rovnic o celkem 24 neznámých (moment, poloha, rychlost a zrychlení pro každou osu).

Rovnice systému je možné zapsat v následujícím maticovém tvaru jako

$$T = M(\dot{\theta},\theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta},\theta)\dot{\theta} + G(\theta) + f_v\dot{\theta} + f_c sign(\dot{\theta}) \tag{3.1}$$

kde

$T = [T_1 \cdots T_n]^T$ je vektor momentů sil působících na jednotlivé osy robota

$\ddot{\theta} = [\ddot{\theta}_1 \cdots \ddot{\theta}_n]^T$ je vektor úhlových zrychlení na jednotlivých osách

$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \cdots \dot{\theta}_n]^T$ je vektor úhlových rychlostí na jednotlivých osách

$M(\dot{\theta},\theta)$ je matice setrvačnosti tvořena tenzory setrvačnosti jednotlivých os

$C(\dot{\theta},\theta)$ je matice Coriolisových a odstředivých sil působících na jednotlivé osy

$G(\theta)$ je matice gravitačních sil působících na jednotlivé osy

f_v je vektor koeficientů viskózního tření v jednotlivých osách

f_c je vektor koeficientů Coulombova suchého tření v jednotlivých osách

n je počet os

K výpočtu okamžité spotřeby elektrické energie je nutné řešit inverzní dynamickou úlohu, kdy se z okamžitých poloh, rychlostí a zrychlení na jednotlivých osách robota vypočítají točivé momenty, kterými působí motory. Moment síly motoru je závislý na proudu protékajícím jeho vinutím. Tuto závislost je často možné aproximovat lineární závislostí a psát jako

$$T(t) = KI(t) \tag{3.2}$$

kde

$T(t)$ $[Nm]$ moment síly motoru

K $[Nm/A]$ momentová konstanta

$I(t)$ $[A]$ proud protékající motorem

Momentové konstanty jednotlivých motorů je možné zjistit v jejich dokumentaci. Nástroj TRACE robotu KUKA KR5 takto počítá momenty sil jednotlivých motorů.

3.2 Elektrický výkon

3.2.1 Obecný vztah

Okamžitý elektrický výkon v je definován jako součin okamžitého napětí a okamžitého proudu v obvodu jako

$$p(t) = u(t)i(t) \tag{3.3}$$

kde v případě harmonického střídavého napětí a proudu platí

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m cos(\omega t + \phi) \\ i(t) &= I_m cos(\omega t + \phi + \psi) \end{aligned} \tag{3.4}$$

kde U_m je maximální amplituda napětí, I_m je maximální amplituda proudu, ω je frekvence, ϕ je počáteční fáze proudu a napětí a ψ je fázový posun mezi napětím a proudem.

Pokud je fázový posun ψ mezi napětím a proudem nenulový, je potřeba rozdělit elektrický výkon na činnou a jalovou složku. Činná složka výkonu je výkon, který je přenášen ze zdroje do spotřebiče a který je schopen konat práci. Pro činnou složku výkonu platí následující vztah

$$P = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} p(t)dt = UIcos\phi \tag{3.5}$$

kde U je efektivní hodnota napětí a I je efektivní hodnota proudu.

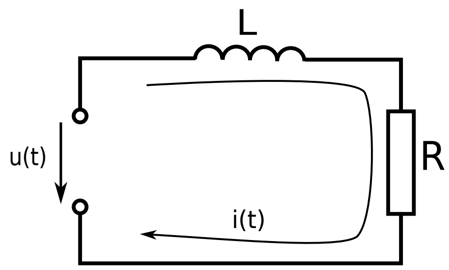
V případě třífázové soustavy je její celkový výkon roven součtu výkonů na jednotlivých fázích. Platí tedy

$$P = P_U + P_V + P_W \tag{3.6}$$

kde U, V, W jsou jednotlivé fáze v třífázové soustavě.

3.2.2 Elektrický výkon synchronního motoru

V případě výpočtu výkonu elektrického motoru je potřeba vytvořit model jeho vinutí. Synchronní motor s permanentními magnety je možné zjednodušeně modelovat jako stejnosměrný (DC) motor. Jeho elektrické schéma je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Elektrické schéma vinutí synchronního motoru.

R je vnitřní elektrický odpor vinutí a L je jeho indukčnost. Tyto hodnoty jsou zpravidla udávány v datasheetech k motorům.

Okamžitý elektrický výkon motoru je poté možné z měření okamžité efektivní hodnoty proudu vypočítat jako

$$p(t) = i(t)u(t) = i(t)\left(i(t)R + L\frac{di(t)}{dt}\right) \tag{3.7}$$

Celkový okamžitý elektrický výkon při pohybu robota je poté dán jako součet okamžitých výkonů na všech jeho motorech

$$P(t) = \sum_{i=1}^{N} p_i(t) \tag{3.8}$$

kde N je počet motorů.

3.3 Solver ReDySim

Pro usnadnění odvození soustavy rovnic pro robota o 6 stupních volnosti a pro případnou standardizaci metody pro použití i pro jiné typy robotů byl použit skript pro matematický nástroj MATLAB využívající solver Recursive Dynamic Simulator (ReDySim)[**?**]. Tento nástroj byl vyvinut na univerzitě v Dillí a je bezplatně k dispozici ke stažení a použití v MATLABu. Je schopen generovat rovnice pro libovolný počet os a to jak pro rotační, tak lineární osy.

Jeho vstupními parametry jsou modifikované DH (Denavit-Hartenbergovy) parametry robota a dynamické parametry s numerickými nebo symbolickými hodnotami. Výstupem je poté skript pro MATLAB s vygenerovanými pohybovými rovnicemi zadaného robota.

3.4 Modifikované DH parametry robota

Modifikované Denavit-Hartenbergovy (DH) parametry jsou parametry, pomocí nichž je možné kompletně popsat geometrii a kinematiku sériového robota. Jedná se o čtyři parametry pro každou osu robota, které definují vzájemnou polohu a konfiguraci sousedících os.

Parametr $a_i[m]$ popisuje délku ramena i, $b_i[m]$ udává odsazení ramena i podél osy rotace ramena $i-1$, parametr $\alpha_i[°]$ určuje vzájemný úhel natočení mezi osou $i+1$ a osou i a poslední parametr $\theta_i[°]$ udává okamžitý úhel natočení osy i.

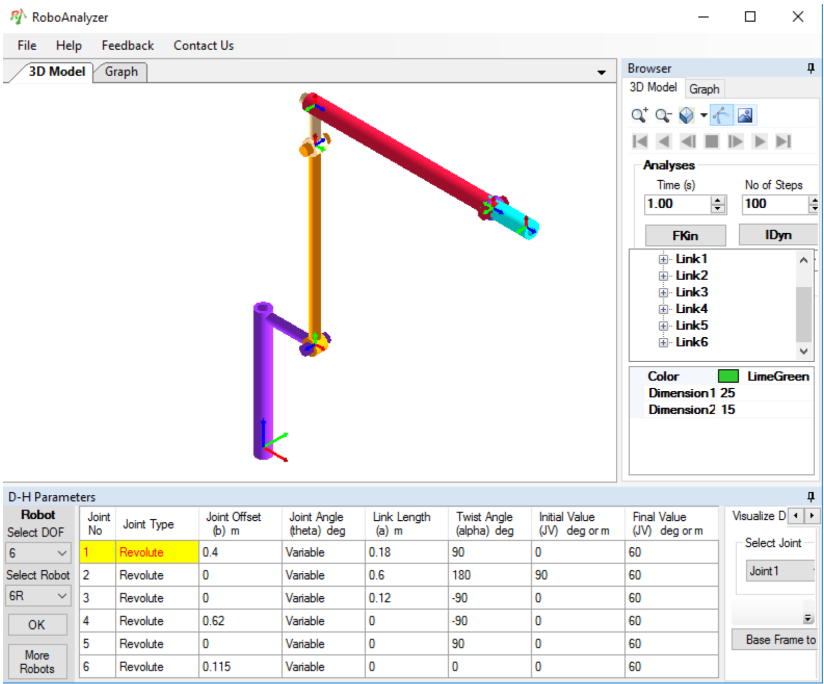
V tabulce č.3.1 je DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc použita v nástroji ReDySim.

Osa	$a_i[m]$	$b_i[m]$	$\alpha_i[°]$	$\theta_i[°]$
1	0.18	0.4	90	-
2	0.6	0	180	-
3	0.12	0	-90	-
4	0	0.62	-90	-
5	0	0	90	-
6	0	0.115	0	-

Tabulka 3.1: Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.

Přesné délky jednotlivých ramen a vzájemné polohy jednotlivých os robota je možné nalézt v jeho dokumentaci.

Pro vizualizaci DH parametrizace je možné použít nástroj RoboAnalyzer [[?]], který byl vyvinut společně se solverem ReDySim pro účely vizualizace a simulace. RoboAnalyzer umožňuje simulovat jednoduché pohyby robota s až 7 osami a vykreslovat průběhy stavů jako jsou polohy, rychlosti, zrychlení a momenty sil na jednotlivých osách. Vizualizace použité DH parametrizace pro robota KUKA KR5 Arc v prostředí RoboAnalyzer je na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.

Kapitola 4

Identifikace systému

U robotického manipulátoru zpravidla nejsou zcela známy informace o dynamických parametrech robota, jako jsou momenty setrvačnosti, hmotnosti nebo koeficienty tření jednotlivých os. Tyto informace nejsou v běžných situacích poskytovány ani samotnými výrobci robotů. Je to hlavně proto, že pro zákazníka nejsou tyto údaje důležité, protože se robotické manipulátory dodávají jako hotové uzavřené systémy připravené k použití. Jejich řízení je již implementováno v řídícím systému robota.

Z toho důvodu je nutné tyto parametry nějakým způsobem odvodit. Toho je možné docílit několika hlavními způsoby.

4.1 Z přímého měření součástí robota

Dynamické parametry je možné určit rozebráním robota na menší součásti a přímým měřením jejich dynamických vlastností. Tento způsob se jeví jako nejpřirozenější.

Určení parametrů takovýmto způsobem je ale možné pouze u jednoduchých laboratorních modelů robota tvořených malým počtem součástí. U větších a složitějších robotů je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivé linky sestávají z více komponent, jako jsou převodovky motorů, napájecí a komunikační vedení motorů atd. Ty dále sestávají z dalších komponent.

Další nevýhodou je nemožnost zobecnění tohoto způsobu na více typů robotů. Každý typ robota by se musel rozebrat a změřit, i kdyby se jednalo o robota podobné konstrukce. Proto se tato práce tímto postupem dále nezabývá.

4.2 Z 3D modelu

Výrobce poskytuje k robotu KUKA KR5 3D model. Ten je možné analyzovat v nástrojích CAD jako je například AutoCAD nebo Siemens NX, které jsou schopny počítat momenty setrvačnosti a hmotnosti libovolně složitých objektů. Výhodou tohoto postupu je jeho rychlost a jednoduchost. Navíc je takto možné získat hledané parametry bez nutnosti přístupu k opravdovému fyzickému robotu. Je také možné tento postup zobecnit na libovolný typ robota.

3D model ale popisuje pouze povrchovou geometrii jednotlivých komponent robota a neobsahuje informace o jejich vnitřní konstrukci ani hustotě použitých materiálů. Je sice možné považovat jednotlivá ramena robota za homogenní a hmotnost odhadnout z celkové hmotnosti robota udávané v datasheetu, tento postup ale dává jen velmi hrubý odhad dynamických parametrů. Navíc z 3D modelu není možné získat informace o koeficientech tření os. Tento postup je zde použit pouze pro účely porovnání určených hodnot.

4.3 Z rovnic

Přestože jsou dynamické rovnice robota 3.1 nelineární vůči zobecněným souřadnicím, jsou lineární vůči jednotlivým složkám dynamických parametrů. Proto je možné je přepsat do tvaru

$$T = H(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)P \tag{4.1}$$

kde

$T = [T_1 \cdots T_n]^T$ je vektor momentů

$P = [P_1 \cdots P_n]^T$ je vektor neznámých dyn. parametrů jednotlivých os a $\quad P_i = [I_{ixx}\ I_{ixy}\ I_{iyy}\ I_{iyz}\ I_{izz}\ I_{izx}\ m_i r_{ix}\ m_i r_{iy}\ m_i r_{iz}\ m_i f_{vi}\ f_{ci}]^T$

kde

I_{ijk} je složka setrvačnosti pro link i vůči souřadnicím j a k

r_{ij} je složka vektoru těžiště linku i vyjádřená v souřadnici x

m_i je hmotnost linku i

f_{vi} je koeficient viskózního tření linku i

f_{ci} je koeficient Coulombova tření linku i

Počet neznámých je možné zredukovat, protože některé parametry dynamiku robota neovlivní. Je to způsobeno tím, že se některé linky mohou otáčet jen kolem některé z os. Příkladem může být osa 1 (spojená se zemí), která se v prostoru může otáčet jen kolem jedné osy. Zároveň je možné si model zjednodušit uvažováním pouze prvků na hlavní diagonále tenzorů setrvačnost a zanedbáním prvků mimo ni.

V následující tabulce (tabulka 4.1) je přehled hledaných neznámých dynamických parametrů.

Osa	Neznámé parametry								
1							I_{1z}	f_{v1}	f_{c1}
2	I_{2xx}	I_{2yy}	I_{2zz}	d_{2x}	d_{2y}	d_{2z}	m_2	f_{v2}	f_{c2}
3	I_{3xx}	I_{3yy}	I_{3zz}	d_{3x}	d_{3y}	d_{3z}	m_3	f_{v3}	f_{c3}
4	I_{4xx}	I_{4yy}	I_{4zz}	d_{4x}	d_{4y}	d_{4z}	m_4	f_{v4}	f_{c4}
5	I_{5xx}	I_{5yy}	I_{5zz}	d_{5x}	d_{5y}	d_{5z}	m_5	f_{v5}	f_{c5}
6	I_{6xx}	I_{6yy}	I_{6zz}	d_{6x}	d_{6y}	d_{6z}	m_6	f_{v6}	f_{c6}

Tabulka 4.1: Tabulka nezámých parametrů

Naměřením průběhů momentů, poloh, rychlostí a zrychlení na jednotlivých osách a jejich dosazením do lineární rovnice 4.1 lze pak tuto rovnici řešit ve tvaru

$$P = H(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)^{-1} T \tag{4.2}$$

Důležité je na trajektorii mít tolik bodů, aby z rovnice 4.1 vznikla rovnice přeurčená. Takovou rovnici je poté možné řešit například použitím metody nejmenších čtverců. Ta minimalizuje střední odchylku mezi skutečnými a odhadnutými parametry.

4.4 Excitační trajektorie

Aby bylo možné robota takto identifikovat, je potřeba s robotem provést takové pohyby, aby byly vybuzeny všechny dynamické složky robota, tzn. aby se projevily všechny neznámé parametry. Ve vědeckých článcích a v jiných publikacích např. [**?**][**?**][**?**] se na jednotlivých osách doporučují průběhy, které je možné popsat konečnou Fourierovou řadou. Jejich výhodou je, že díky vlastnostem harmonické funkce jsou poté jak polohy, tak i rychlosti a zrychlení rovněž kombinací harmonických průběhů a tím se minimalizuje vliv šumu měření.

Protože se robot používá převážně pro polohování, jeho řídící systém zpravidla neumožňuje na osách provádět čistě harmonické průběhy. Řídící systém robota KUKA KR5 umožňuje pouze nastavit požadované koncové polohy os a rychlosti/zrychlení, s jakými jich má robot dosáhnout. Z toho důvodu je nutné robotu poskytnout sérii bodů popisujících harmonický průběh. Výsledná trajektorie robota poté bude pouze aproximací harmonického průběhu.

Bohužel takové průběhy momentálně nejsou k dispozici a kvůli odstavení robota je v tuto chvíli nelze naměřit. Identifikace tedy byla zatím provedena na dříve naměřených průbězích, kdy robot postupně 10x zahýbal osou 1, poté se zastavil, zahýbal osou 2 a tak pokračoval až k poslední ose.

4.5 Postup identifikace

Při identifikaci parametrů se postupovalo od poslední, šesté osy (konečného linku) k první. Nejprve se pevně zafixovaly ostatní osy a z průběhů na šesté ose se metodou nejmenších čtverců pomocí rovnice 4.2 určily její dynamické parametry. Poté se tento postup zopakoval pro předchozí osu až k ose první.

Takto se podařilo odvodit některé dynamické parametry. Protože se ale jednalo o šest nezávislých měření pro šest pohybů s ostatními osami pevně zafixovanými, nepokryla se kompletní škála pohybů a neprojevila se při těchto průbězích veškerá dynamika. Proto se nepodařilo odvodit všechny neznámé parametry.

Kapitola 5

Odvozené parametry

Identifikované parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1. Křížkem jsou označeny hodnoty, které se nepodařilo plně identifikovat. Hodnoty jsou uvedeny v základních jednotkách SI. Z tabulky je možné vypozorovat, že šestý link se podařilo identifikovat plně. Problém nastal už u linku č.5, jehož hmotnost vyšla nulová, protože neměla při těchto průbězích na dynamiku vliv. Kvůli tomu již hmotnosti následujících linků nemohou být správně identifikovány, protože jejich rovnice jsou na tomto parametru závislé.

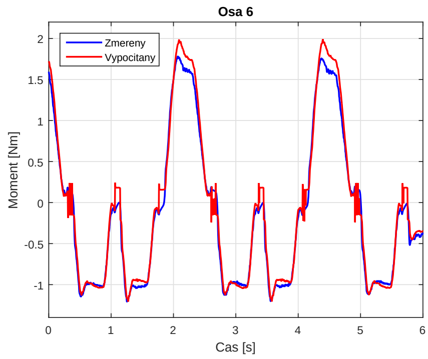
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1			x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	0	0	0.013	0.0053	-0.001	x	0	0.1516	0.2757
5	0	0.013	0.0135	-0.0017	0.007	0.001	0	0.0739	0.1576
6	0.0065	0.007	0.0049	-0.0047	-0.0012	-0.0039	0.0055	0.0835	0.1926

Tabulka 5.1: Tabulka odvozených parametrů

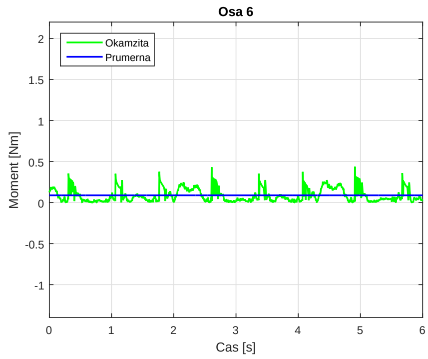
5.1 Simulace odvozených parametrů

Na následujících obrázcích jsou odsimulované točivé momenty s odvozenými parametry pro osy 4 až 6. Pro další osy simulace provedeny nebyly, protože se pro ně nepodařilo správně odvodit všechny jejich dynamické parametry.

Na obrázku 5.1a je porovnání mezi skutečným naměřeným momentem a vypočítaným z odvozených parametrů pro osu 6. Na druhém obrázku 5.1b je poté zobrazena okamžitá a průměrná odchylka mezi naměřeným a vypočítaným momentem.



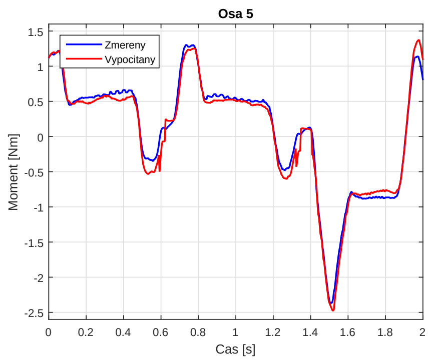
(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů



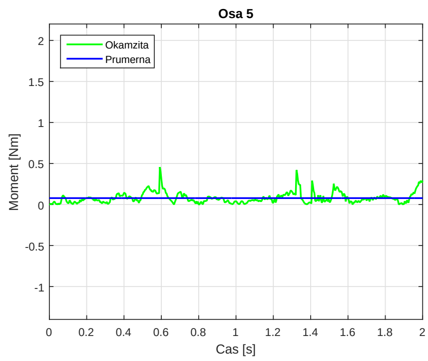
(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.1: Točivé momenty pro osu 6.

Stejné průběhy pro osu 5 jsou na obrázku 5.2 a pro osu 4 na obr. 5.3.

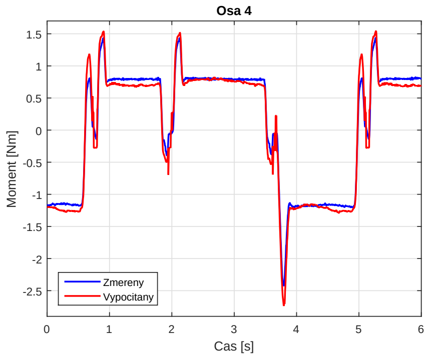


(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

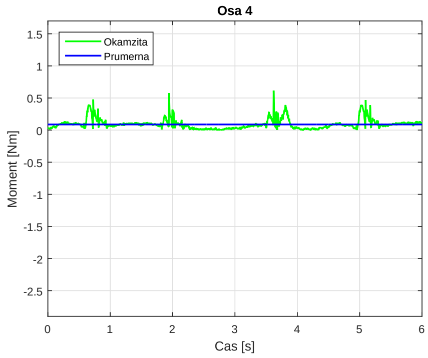


(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.2: Točivé momenty pro osu 5.



(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů



(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.3: Točivé momenty pro osu 4.

Z výše uvedených průběhů je patrné, že vypočítané a naměření průběhy si poměrně odpovídají. Ve všech případech se průměrná odchylka pohybuje kolem jedné desetiny Nm a maximální okamžitá odchylka nepřesahuje šest desetin Nm.

Kapitola 6

program

Kapitola 7

databaze