

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

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Suslov Andrej**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Identifikace 6-osého průmyslového robotu**

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudujte principy identifikace dynamických parametrů 6 osých robotických manipulátorů.
2. Sestavte strukturovaný dynamický model 6 osého robotu a identifikujte jeho parametry.
3. Zvalidujte identifikovaný model za využití měření na reálném robotu.
4. Prozkoumejte vliv odchylek v hodnotách parametrů na přesnost energetického modelu robotu a své závěry otestujte na reálném robotu.
5. Zautomatizujte proceduru přípravy dat z databáze dlouhodobého měření energetické spotřeby robotické buňky.

Seznam odborné literatury:

- [1] S. M. Hashemi and H. Werner, 'Parameter identification of a robot arm using separable least squares technique,' 2009 European Control Conference (ECC), Budapest, 2009, pp. 2199-2204.
- [2] Wu, W., Zhu, S., Wang, X., & Liu, H. (2012). Closed-loop dynamic parameter identification of robot manipulators using modified Fourier series. International Journal of Advanced Robotic Systems, 9(1), 29.
- [3] B. Siciliano, L. Sciacicco, L. Villani, G. Oriolo, 'Robotics: Modelling, Planning and Control,' London: Springer, 2009.
- [4] SPONG, Mark W., Seth. HUTCHINSON a M. VIDYASAGAR. Robot modeling and control. Hoboken, NJ: John Wiley, c2006. ISBN 9780471649908. ISBN: 1846286425.

Vedoucí: Ing. Martin Ron

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze, dne 21. 2. 2017

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Martinu Ronovi za jeho cenné rady a vedení při tvorbě této práce. Jeho pomoc byla velikým přínosem během celého průběhu jejího vzniku.

Dále bych rád poděkoval svým nejbližším, rodině a přítelkyni, za jejich podporu během tvorby této práce, během celého studia i osobního života.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 24. května 2017

.....

Abstrakt

Tato práce se zabývá odvozením a identifikací modelu 6-osého průmyslového robota. Tento model je následně použit k predikci jeho energetické spotřeby. V první části jsou nastíněny způsoby odvození dynamických rovnic robota. Nasleduje kapitola zabývající se různými způsoby identifikace a jejich vzájemným srovnáním. V další části je popis vytvoření a identifikace modelu robota a jeho porovnání s reálnými změřenými hodnotami. Dále se práce zabývá způsobem měření elektrického výkonu robota a konečným porovnáním modelem predikovaných hodnot s reálným měřením. Následuje kapitola popisující analýzu vlivu odchylek identifikovaných parametrů na přesnost modelu. V poslední části je popis vytvořené aplikace pro přípravu dat dlouhodobého měření spotřeby elektrické energie.

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

Abstract

This thesis is focused on derivation and identification of a model of a 6-axis industrial robot. Derived model is then used for prediction of robot's energy consumption. In the first part there are outlined some approaches to derive dynamic equations of a robot. It is followed by different ways of parameter identification and their comparison. Next part is focused on actual creation and identification of robot's model and its comparison with measurements. Further, the thesis is focused on measurement of robot's electrical power and final comparison between prediction and real measurement. In the next chapter there is a description of analysis of influence of deviations in identified parameters on model precision. Finally, there is a description of created application for preparation of data of long-term measurement of energy consumption.

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

Obsah

1 Úvod	1	6 Měření elektrického výkonu	31
1.1 Motivace	1	6.1 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750	32
1.2 Očekávaný přínos	2	6.2 PLC Siemens S7-300	32
2 Robotický systém	3	6.3 Aplikace DEPO	33
3 Dynamický model	5	7 Srovnání výsledků	35
3.1 Pohybové rovnice	5	7.1 Dosažitelná přesnost modelu ...	35
3.2 Tření.....	7	7.2 Srovnání modelu výkonu s reálným měřením	36
3.3 Elektrický výkon a spotřeba elektrické energie	8	7.3 Analýza odchylek	38
3.3.1 Elektrický výkon robotu	9	8 Vliv odchylek v parametrech na přesnost modelu	41
3.3.2 Elektrický výkon v třífázové soustavě	10	8.1 Metoda Monte Carlo	41
3.4 Solver ReDySim	12	8.2 Vyhodnocení	42
3.5 Modifikované DH parametry robota.....	12	9 Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby	45
4 Identifikace systému	15	9.1 Databáze MongoDB.....	45
4.1 Způsoby identifikace	15	9.2 Aplikace MongoDB data exporter	45
4.1.1 Z přímého měření součástí robota	15	10 Závěr	49
4.1.2 Z 3D modelu	16	10.1 Výsledky práce	49
4.1.3 Z rovnic	17	10.2 Práce do budoucna	49
4.1.4 Excitační trajektorie	19	Reference	51
4.2 Postup identifikace	19		
4.2.1 Identifikační trajektorie	20		
4.3 Skript pro MATLAB	21		
5 Identifikované parametry	23		
5.1 Simulace odvozených parametrů	24		

Obrázky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [6].	3
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [6].	4
3.1 Model tření os	8
3.2 Elektrické schéma vinutí synchronního motoru.	10
3.3 Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.	13
4.1 3D model robotu KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0.	16
5.1 Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry	27
5.2 Srovnání odchylek modelů a měření	29
6.1 Schéma zapojení soustavy pro měření výkonu.	31
6.2 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750.	32
7.1 Srovnání vypočítaného výkonu z modelu a z měření proudu	36
7.2 Skutečný změřený výkon robotu	37
7.3 Srovnání měření a modelu výkonu	37
7.4 Fázový posun mezi napětím a proudem na napájecím vedení robotu	39
7.5 Srovnání celkových změřených proudů	40
8.1 Vliv odchylek vybraných parametrů na přesnost modelu	43

9.1 Ukázka prostředí aplikace MongoDB data exporter.	46
--	----

Tabulky

3.1 Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.	12
4.1 Tabulka nezáměch parametrů robota KUKA KR5 Arc.	18
5.1 Tabulka parametrů identifikovaných z rovnic	23
5.2 Tabulka parametrů identifikovaných z 3D modelu	23
5.3 Srovnání průměrných odchylek modelů vůči měření	30
8.1 Tabulka maximálních dosažených odchylek vzhledem k odchylkám v parametrech	42

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

Průmyslové robotické manipulátory jsou dnes již nedílnou součástí průmyslové sféry. Na rozdíl od jednoduchých jednoúčelových průmyslových strojů, které jsou úzce specializované pouze na jeden typ operace, jsou průmyslové roboty zamýšleny jako víceúčelové stroje, které jsou schopny vykovávat téměř libovolnou operaci. Spektrum možných operací průmyslových robotů je omezeno pouze jejich vlastní geometrií, uspořádáním pracovního prostoru ve kterém jsou roboty provozovány a mechanickými vlastnostmi jejich aktuátorů a jednotlivých prvků. Díky těmto vlastnostem je jeden průmyslový robot schopen vykovávat operace, ke kterým by jinak bylo potřeba více strojů, a to jen změnou programu. Dnes se roboty v průmyslu používají pro mnoho typů operací. Patří mezi ně svařování, montáž, manipulace s materiálem, lakování, vrtání a mnoho dalších.

Rozšiřování automatizačních technologií a použití robotů v průmyslu přispívá ke stálému zvyšování produktivity podnikání, urychlování a zpřesňování výrobních procesů, standardizaci výrobních postupů a zvyšování bezpečnosti pracovníků. Toto navyšování počtu průmyslových strojů a automatických systémů má ale za následek neustále se zvětšující energetickou náročnost a zátěž průmyslových subjektů. Tento nárůst spotřeby energie má exponenciální charakter a z mnoha předpovědí je možné říct, že bude tímto tempem pokračovat i v budoucnu. Se zvyšováním množství spotřebované energie navíc roste její cena.

Z těchto důvodů a také z důvodu ekologie vzniká snaha o maximální možné snížení spotřeby energie a o maximální možné zefektivnění jejího využití. Snížování produkce není kvůli narůstající poptávce zákazníků možným řešením. Proto se hledají další způsoby, jakými by bylo možné energetickou spotřebu snížit. Jedním z možných řešení je optimalizace procesů s ohledem na jejich energetickou náročnost. Dále je možné provádět analýzy spotřeby

energie procesů v delším časovém horizontu a podle nich plánovat procesy za účelem jejich zefektivnění.

1.2 Očekávaný přínos

Cílem této práce je vytvoření matematického modelu průmyslového robotického manipulátoru za účelem modelování jeho spotřeby elektrické energie při vykonávání daných robotických operací.

Tento model je následně možné použít pro predikci energetické náročnosti požadovaného procesu, bez nutnosti měření spotřeby na skutečném fyzickém robotu. Dále je možné model využít k optimalizaci robotických operací, jako je plánování pohybových trajektorií robota s optimální energetickou náročností.

Pokud jsou k dispozici data o skutečné změřené spotřebě robota, je zde možnost tento model využít inverzně, kdy ze známé spotřeby energie je možné pomocí různých metod určit pohyby, jaké robot vykonával.

Modelování průmyslových robotů již bylo předmětem několika prací. Nejčastěji tyto odvozené modely slouží pro návrh řízení robota nebo jeho optimalizaci. Tato práce je zaměřena na modelování robota a jeho identifikaci z hlediska jeho spotřeby elektrické energie.

Protože dynamické parametry robota potřebné pro vytvoření modelu často nejsou známy, je nezbytné tyto parametry identifikovat. Identifikací parametrů se již zabývalo několik prací. V článcích [15][18] je použita identifikace dynamických parametrů z dynamických rovnic pomocí metody nejmenších čtverců. Práce [10][14] se zabývají identifikací touto metodou robota Mitsubishi PA-10. Jiným způsobem se postupuje v článcích [1] a [2], které se zabývají identifikací systému pomocí 3D modelu. V této práci jsou k identifikaci použity obě metody, které jsou následně porovnány.

V průmyslu je používána široká škála robotických manipulátorů od různých výrobců, lišících se počtem os, celkovou geometrií, použitými pohony a dynamickými parametry. Tato práce se proto snaží vytvořit standardizovanou metodiku pro vytvoření energetického modelu, kterou by bylo možné použít na téměř libovolného sériového průmyslového robota.

Kapitola 2

Robotický systém

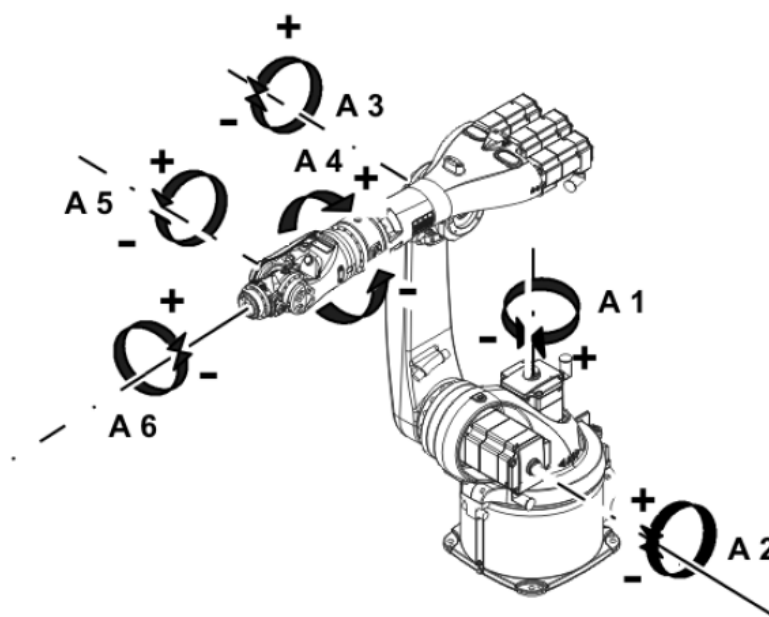
Vytvoření modelu a jeho identifikace byla provedena pro průmyslového robota KUKA KR5 Arc [6] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osový robota, který má 6 rotačních os poháněných synchronními servomotory.

Osy robotu jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Díky tomu je robot schopen vykonávat široké spektrum operací, které je schopen vykonávat člověk. Konfigurace jednotlivých os robota je zobrazena na obrázku 2.2. Osy jsou značeny čísla 1 až 6, kde číslem 1 je označena osa spojená se zemí a číslem 6 je označena osa, na kterou se připojuje konečný efektor.



Obrázek 2.1: Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [6].

Robot KUKA KR5 Arc 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. Robot je schopen polohovat koncový efektor s přesností do 0,04 mm. Objem pracovní obálky je 8,4 m³. Díky lehké konstrukci a výkonným pohonům os je robot schopen dosahovat vysokých provozních rychlostí s rychlostí koncového efektoru přesahující 5 m/s.



Obrázek 2.2: Konfigurace os robota. Převzato z [6].

K pohánění os robota KUKA KR5 Arc jsou použity třífázové synchronní servopohony s permanentními magnety (PMSM). Jejich točivé momenty a rychlosti jsou řízeny pomocí frekvenčních měničů, které jsou součástí řídicí jednotky robota. Pro zvýšení točivého momentu motorů a přesnosti polohování jsou všechny motory opatřeny převodovkou. Servomotory jsou vybaveny snímači pro snímání úhlu natočení rotoru, sondami pro měření proudu protékajícího jejich vinutím a teplotními senzory pro měření teploty uvnitř motorů. Jednotlivé osy jsou dále vybaveny brzdícím mechanismem, který zabraňuje jejich otáčení, pokud není robot v aktivním pohybu.

Součástí robota je i řídicí 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 řídicího systému je i užitečný nástroj TRACE, umožňující sledování vnitřních stavů robota jako jsou polohy, rychlosti a zrychlení jednotlivých os, jejich momenty, protékající proudy a mnoha dalších.

Celý systém je napájen z třífázové soustavy elektrické energie. Je určen pro montáž na zem nebo strop ve vnitřních prostorách. Podrobnější informace je možné nalézt v katalogovém listu [6].

Kapitola 3

Dynamický model

Pro výpočet a predikci spotřeby elektrické energie robotického manipulátoru je nezbytné vytvořit matematický model robotu popisující jeho dynamiku.

Robot KUKA KR5 Arc je mechanický systém tvořený šesti sériově spojenými rameny. Každé rameno se může nezávisle na ostatních otáčet otáčet kolem své vlastní osy rotace. Okamžitou konfiguraci ramen robotu i pozici koncového efektoru v prostoru je tak možné popsat šesti souřadnicemi odpovídajícími úhlům natočení jednotlivých os. Jedná tak o systém se šesti stupni volnosti. K popisu jeho dynamiky je proto potřeba celkem 6 rovnic druhého řádu. Celkově se tedy jedná o dynamický 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 [[7]].

Newton-Eulerova metoda je založena na přístupu k systému jako k soustavě jednotlivých jeho součástí a vyžaduje určení pohybových rovnic každé jednotlivé komponenty. Výsledná dynamika je poté součtem dynamik všech dílčích komponent systému. Protože jsou jednotlivé osy sériových robotických manipulátorů vzájemně kinematicky propojeny, jsou i pohybové rovnice jednotlivých jejich 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 celkové kinetické a potenciální energie systému. Dynamické rovnice systému je poté možné odvodit vypočtením Lagrangeových rovnic druhého druhu pro všechny stupně volnosti systému.

Oba přístupy nakonec vedou ke stejným rovnicím. Protože je pohyb a dynamika systému popisována pomocí úhlů na jednotlivých osách a jejich

derivací, vyskytují se v jeho rovnicích nelineární goniometrické členy. Výsledné rovnice systému jsou proto silně nelineární.

V případě robota KUKA KR5 Arc se jedná o soustavu 6 rovnic o celkem 24 neznámých - moment síly, poloha, úhlová rychlost a úhlové zrychlení pro každou z šesti os. Pro zlepšení přehlednosti rovnic systému je možné tyto rovnice zapsat v následujícím maticovém tvaru jako

$$T = M(\dot{\theta}, \theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta)\dot{\theta} + G(\theta) \quad (3.1)$$

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 momentů sil působících na jednotlivé osy

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

n je počet os

K výpočtu okamžité spotřeby elektrické energie je nutné řešit inverzní dynamickou úlohu (rovnice 3.1), kdy se z okamžitých poloh, úhlových rychlostí a úhlových zrychlení na jednotlivých osách robota vypočítají točivé momenty, kterými působí motory.

Moment síly motoru je závislý na proudu protékajícím jeho vinutím. Tuto závislost je obvykle možné aproximovat lineární závislostí [[3]] a psát jako

$$T(t) = KI(t) \quad (3.2)$$

kde

$T(t)[Nm]$ je moment síly motoru

$K[Nm/A]$ je momentová konstanta

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

Nástroj TRACE robota KUKA KR5 Arc tímto způsobem počítá točivé momenty jednotlivých motorů. Momentové konstanty jednotlivých motorů jsou obvykle poskytovány výrobcí a je možné je dohledat v jejich dokumentaci.

3.2 Tření

Odvozené rovnice dynamiky robota popsané výše v sekci 3.1 popisují pouze ideální model, ve kterém nedochází k žádným energetickým ztrátám. V reálných motorech ale kromě elektrických ztrát v jejich vinutích dochází také k energetickým ztrátám v důsledku tření v ložiscích motorů, rotačních os a tření v převodovkách.

Úplný popis tření v rotačních systémech je relativně komplikovaný, protože se jedná o silně nelineární děj, který navíc obecně bývá závislý na čase a na okolních podmínkách. Proto se zpravidla pro modelování tření používá zjednodušený model popisující tření jako kombinaci viskózního a Coulombova tření [5].

Viskózní tření motoru je moment síly působící proti otáčení motoru, který je lineárně závislý na jeho rychlosti rotace. Při nulové rychlosti je třecí moment síly nulový a s rostoucí rychlostí se zvyšuje. Při změně směru otáčení motoru se mění i směr působení třecího momentu.

Coulombovo tření je naopak na rychlosti rotace nezávislé. V systému je přítomno vždy a vždy se stejnou magnitudou. Mění se pouze se změnou směru otáčení, kdy mění znaménko.

Tento použitý popis tření je popsán rovnicí

$$T_f = f_v \dot{\theta} + f_c \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (3.3)$$

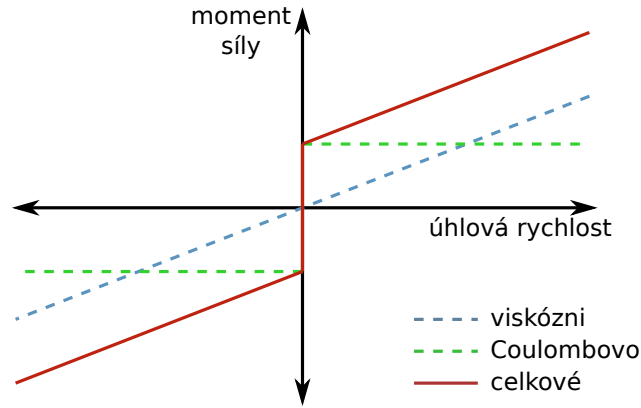
kde

T_f je moment síly generovaný třením

f_v je koeficient viskózního tření

f_c je koeficient Coulombova tření

Na následujícím obrázku (obr. 3.1) je znázorněn použitý model tření včetně jeho jednotlivých složek. Na vodorovné ose je uvedena úhlová rychlost otáčení, na svislé ose je generovaný třecí moment síly.



Obrázek 3.1: Model tření os

Doplněním rovnic tření 3.3 do dynamických rovnic robota 3.1 se získají celkové rovnice dynamiky robota ve tvaru

$$T = M(\dot{\theta}, \theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta)\dot{\theta} + G(\theta) + F_v\dot{\theta} + F_c\text{sign}(\dot{\theta}) \quad (3.4)$$

kde

$F_v = [F_{v1} \cdots F_{vn}]^T$ je vektor koeficientů viskózního tření v jednotlivých osách

$F_c = [F_{c1} \cdots F_{cn}]^T$ je vektor koeficientů Coulombova tření v jednotlivých osách

3.3 Elektrický výkon a spotřeba elektrické energie

Výkon je obecně definován jako práce W vykonaná za jednotku času [[11]]. Pro okamžitý výkon platí rovnice

$$p(t) = \frac{dW}{dt} \quad (3.5)$$

Protože se v tomto případě jedná o elektrickou práci, resp. práci elektromagnetického pole, je tato práce definovaná jako element náboje dq přenesený mezi dvěma místy s napětím u . Po jejím dosazení platí vztah

$$p(t) = \frac{u(t)dq}{dt} \quad (3.6)$$

Protože element náboje dq přenesený za čas dt odpovídá okamžitému proudu, je možné vzorec pro okamžitý výkon upravit na

$$p(t) = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t)i(t) \quad (3.7)$$

Spotřebovaná elektrická energie je definovaná jako celková elektrická práce, která byla vykonaná spotřebičem za čas t . Platí pro ni vztah

$$W = Pt \quad (3.8)$$

Pro její okamžitou hodnotu lze tento vzorec upravit následovně

$$w(t) = p(t) \frac{dt}{dt} = p(t) \quad (3.9)$$

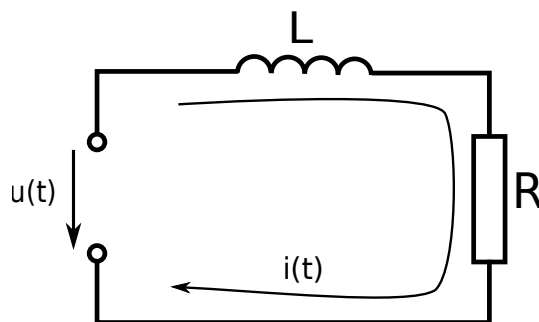
Z tohoto vztahu vyplývá, že okamžitá spotřeba elektrické energie spotřebiče odpovídá jeho elektrickému výkonu. Pro účely modelování spotřeby elektrické energie robotického manipulátoru tedy stačí modelovat robota z hlediska jeho okamžitého elektrického výkonu.

3.3.1 Elektrický výkon robotu

Celkový elektrický výkon robotického manipulátoru je závislý na elektrickém výkonu jednotlivých jeho součástí. Elektrická část robotu je tvořena pohony ramen robotu, senzory poloh, teplot a dalších veličin a jeho centrální řídicí jednotkou.

Je možné předpokládat, že spotřebovaný výkon jednotlivých senzorů a hlavní řídicí jednotky bude přibližně konstantní, protože musí pracovat stejně ze všech podmínek. Tato složka výkonu P_s bude přispívat k celkovému výkonu robotického systému, nebude ale závislá na jeho dynamice. Celkový výkon robotu bude tedy tvořen touto stálou složkou P_s a elektrickým výkonem pohonů robotu.

Osy robotu jsou poháněny elektrickými synchronními servomotory s permanentními magnety. K výpočtu výkonu elektrických motorů je potřeba vytvořit model jejich vinutí. Přestože se jedná o třífázové motory, nejsou k dispozici informace o průbězích napětí a proudu na jednotlivých fázích. Řídicí systém robotu KUKA KR5 Arc poskytuje pouze informace o celkovém efektivním proudu motoru. Z tohoto důvodu je možné synchronní motory s permanentními magnety zjednodušeně modelovat jako stejnosměrné (DC) motory [[3]] tvořené odporem a indukčností v sérii. Elektrické schéma stejnosměrného motoru na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: 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.

Pro okamžité napětí $u(t)$ ze schématu platí vztah

$$u(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.10)$$

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

$$p(t) = i(t)u(t) = i(t) \left(i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \right) \quad (3.11)$$

Celkový okamžitý elektrický výkon při pohybu robota je poté dán jako součet okamžitých výkonů na všech jeho motorech a stálé složky výkonu P_s .

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) + P_s \quad (3.12)$$

kde n je počet motorů.

3.3.2 Elektrický výkon v třífázové soustavě

Celý robotický systém je napájen z třífázové sítě elektrické energie. Třífázová soustava napájení je tvořena třemi fázovými vodiči a jedním centrálním nulovým vodičem. Na všech třech fázových vodičích je střídavé napětí se stejnou efektivní hodnotou. Každá ze tří fází má průběh napětí proti sousedním fázám fázově posunut o 120 elektrických stupňů.

V třífázových sítích jsou na jednotlivých fázích střídavá napětí a proudy. Jejich průběh je popisován harmonickou funkcí. Pro okamžité hodnoty střídavého napětí a proudu platí rovnice

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos(\omega t + \phi) \\ i(t) &= I_m \cos(\omega t + \phi + \psi) \end{aligned} \quad (3.13)$$

kde

U_m je maximální amplituda napětí

I_m je maximální amplituda proudu

ω je úhlová frekvence

ϕ je počáteční fáze proudu a napětí

ψ je fázový posun mezi napětím a proudem

Pokud je fázový posun ψ mezi střídavým napětím a proudem nenulový, například v důsledku induktivního nebo kapacitního charakteru zátěže, je potřeba rozdělit elektrický výkon na jeho činnou a jalovou složku.

Činná složka výkonu P je výkon, který je přenášen ze zdroje do spotřebiče a který je schopen ve spotřebiči konat užitečnou práci. Pro činnou složku výkonu platí následující vztah

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = UI \cos(\phi) \quad (3.14)$$

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

Jalová složka výkonu Q je část výkonu, která je spotřebičem vracená zpět do zdroje a ve spotřebiči tedy žádnou práci nevykonává.

Pro potřeby modelování spotřeby elektrické energie, tedy elektrického výkonu, robotu je důležité určit právě činnou složku výkonu, protože je to ta část výkonu, která je využita k funkci robotu a jeho pohybu.

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

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (3.15)$$

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

3.4 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)[12]. Tento nástroj byl vyvinut na univerzitě v Dillí a je bezplatně k dispozici ke stažení a použití v MATLABu. Je schopen generovat pohybové dynamické rovnice robotu s libovolným počtem os a to jak pro rotační, tak lineární osy.

Vstupními parametry solveru ReDySim jsou modifikované DH (Denavit-Hartenbergovy) parametry robotu a dynamické parametry s numerickými nebo symbolickými hodnotami. Výstupem je poté skript pro MATLAB s vygenerovanými pohybovými rovnicemi zadaného robotu.

3.5 Modifikované DH parametry robotu

Modifikované Denavit-Hartenbergovy (DH) parametry jsou parametry, pomocí nichž je možné kompletně popsat geometrii a kinematiku sériového robotu. Jedná se o čtyři parametry pro každou osu robotu, 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 $\alpha_i[^\circ]$ určuje vzájemný úhel natočení mezi osou $i + 1$ a osou i a poslední parametr $\theta_i[^\circ]$ udává okamžitý úhel natočení osy i .

V tabulce 3.1 je DH parametrizace robotu KUKA KR5 Arc použita v nástroji ReDySim pro vygenerování jeho dynamických rovnic.

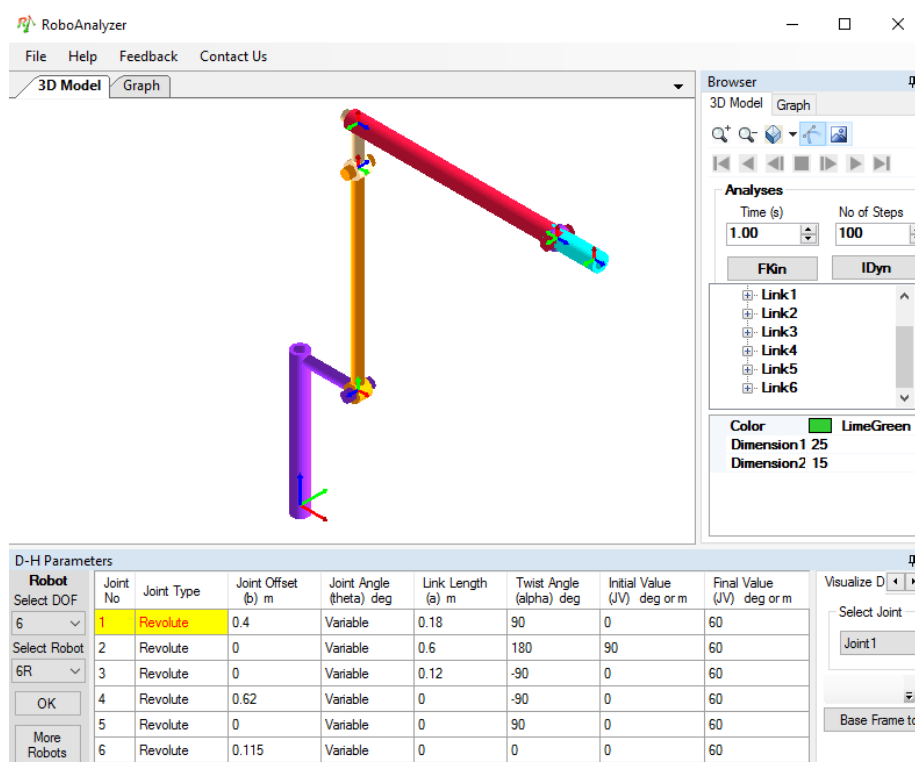
Osa	$a_i[m]$	$b_i[m]$	$\alpha_i[^\circ]$
1	0.18	0.4	90
2	0.6	0	180
3	0.12	0	-90
4	0	0.62	-90
5	0	0	90
6	0	0.115	0

Tabulka 3.1: Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.

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

Pro vizualizaci DH parametrizace je možné použít nástroj RoboAnalyzer [[13]], který byl vyvinut společně se solverem ReDySim pro účely vizualizace a simulace. RoboAnalyzer umožňuje simulovat dopředné a zpětné kinematické

a dynamické úlohy. Dále umožňuje simulovat jednoduché pohyby robota s až 7 osami a vykreslovat průběhy jeho stavů jako jsou polohy, úhlové rychlosti, úhlová zrychlení a momenty sil na jednotlivých osách. Vizualizace použité DH parametrizace pro robota KUKA KR5 Arc v prostředí RoboAnalyzer je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: 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 a jejich řízení je již výrobcem implementováno v jejich řídicím systému.

4.1 Způsoby identifikace

Protože obvykle nejsou známy všechny dynamické parametry, je pro vytvoření dynamického modelu nutné tyto parametry nějakým způsobem získat nebo odvodit. Toho je možné docílit několika způsoby.

4.1.1 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.

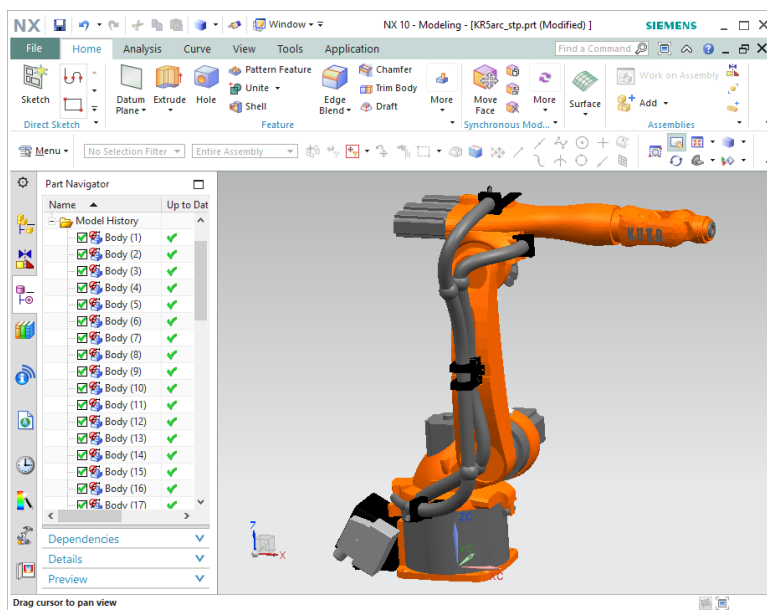
Určení parametrů takovýmto způsobem je ale možné pouze u jednoduchých laboratorních modelů robota tvořených malým počtem součástí. U větších a složitějších robotů, jako jsou průmyslové manipulátory, je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivá ramena sestávají z více komponent, jako jsou samotné kostry ramen, převodovky motorů, napájecí a komunikační vedení motorů a dalších. Ty mohou dále sestávat z dalších součástí. Rozebrání robota navíc může způsobit ztrátu podpory a záruky ze strany výrobce.

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

4.1.2 Z 3D modelu

Výrobci často poskytují ke stažení 3D modely svých robotů. Obvykle tyto modely slouží pro účely vytvoření počítačových simulací nebo modelů výrobních linek. 3D modely je možné použít ke zjištění neznámých dynamických parametrů jejich analýzou v nástrojích CAD, jako je například AutoCAD nebo Siemens NX. Tyto nástroje jsou schopny z geometrie objektů počítat jejich objemy, momenty setrvačnosti, polohy těžišť a hmotnosti.

Výhodou tohoto postupu je jeho rychlost a jednoduchost. Navíc je takto možné získat požadované parametry i bez nutnosti přístupu k opravdovému fyzickému robotu. Tento postup je také možné zobecnit na libovolný typ robotického manipulátoru. Stačí k němu jen mít jeho odpovídající 3D model. 3D model robotu KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0 je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: 3D model robotu KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0.

3D model ale zpravidla popisuje pouze povrchovou geometrii jednotlivých komponent robota a neobsahuje informace o jejich vnitřní konstrukci, typech použitých materiálů, jejich skutečných hmotnostech nebo hustotách. Je zde možnost považovat jednotlivé součásti robotu za tělesa s homogenní hustotou a hmotnosti odhadnout z celkové hmotnosti robotu, která bývá udávána v

jeho datasheetu. Tento postup ale dává jen velmi hrubý odhad dynamických parametrů.

Navíc z 3D modelu není možné získat informace o koeficientech tření v jednotlivých osách.

Tento způsob identifikace je v této práci použit pouze pro účely porovnání určených hodnot s hodnotami odvozenými metodou popsanou v sekci 4.1.3.

■ 4.1.3 Z rovnic

Neznámé dynamické parametry je možné přesně vypočítat pomocí dynamických rovnic robota.

Přestože jsou dynamické rovnice robota 3.4 nelineární vůči jednotlivým zobecněným souřadnicím, jsou lineární vůči jednotlivým složkám dynamických parametrů [[18]][[10]]. Proto je tyto rovnice možné je přepsat do tvaru

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

kde

$T(t) = [T_1(t) \cdots T_n(t)]^T$ je vektor momentů sil na osách v čase t

$P = [P_1 \cdots P_n]^T$ je vektor neznámých dyn. parametrů jednotlivých os

n je počet os

$$a \quad P_i = [I_{ixx} \ I_{ixy} \ I_{iyy} \ I_{iyz} \ I_{izz} \ I_{izx} \ m_i \ m_i d_{ix} \ m_i d_{iy} \ m_i d_{iz} \ f_{vi} \ f_{ci}]^T$$

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 j

m_i je hmotnost linku i

f_{vi} je koeficient viskózního tření linku i

f_{ci} je koeficient Coulombova tření linku i

Počet neznámých parametrů pro jedno rameno robota odpovídá počtu složek vektoru P_i . Ten je roven 12. U sériového průmyslového manipulátoru se šesti rotačními osami je tedy neznámých parametrů celkem 72.

Počet neznámých parametrů je možné zredukovat. Je to možné díky tomu, že některé parametry dynamiku robota neovlivní nebo je jejich vliv zanedbatelný. Důvodem je to, že se některé linky mohou otáčet pouze kolem některé z os. Příkladem může být osa 1 (spojená se zemí, viz schéma 2.2), která se v prostoru může otáčet jen kolem vertikální osy. Tím je možné zanedbat momenty setrvačnosti mimo tuto vertikální osu. Dále je možné zanedbat její hmotnost a polohu jejího těžiště. Zároveň je možné model dále zjednodušit uvažováním pouze prvků na hlavní diagonále tenzorů setrvačnosti a zanedbáním prvků mimo ni.

Díky tomu klesne počet neznámých parametrů v případě šestiosového robota z čísla 72 na číslo 48. V následující tabulce (tabulka 4.1) je přehled výsledných neznámých dynamických parametrů robota KUKA KR5 Arc.

Osa	Neznámé parametry								
1	I_{1zz}								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 neznámých parametrů robota KUKA KR5 Arc.

Hledané parametry je poté možné vypočítat z rovnice 4.1 jejich vyjádřením ve tvaru

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

K výpočtu vektoru P neznámých parametrů je nejprve potřebné s robotem vykonat pohyb po nějaké trajektorii a měřit polohy, úhlové rychlosti, úhlová zrychlení a momenty sil na jednotlivých osách. Do matice $H(\ddot{\theta}(t), \dot{\theta}(t), \theta(t))$ se poté dosadí tyto změřené polohy, úhlové rychlosti a úhlová zrychlení jednotlivých os v čase t a do vektoru $T(t)$ změřené momenty sil v čase t .

Protože je ale neznámých parametrů více než rovnic, nelze tuto rovnici vyřešit jednoznačně. Tento problém lze jednoduše vyřešit naměřením více bodů na trajektorii v různých časech a jejich následným dosazením do rovnice 4.2. Důležité je na trajektorii mít změřen takový počet bodů, aby z této rovnice vznikla rovnice přeurčená. Takovou přeurčenou rovnici je poté možné řešit například použitím metody nejmenších čtverců, která minimalizuje střední odchylku mezi skutečnými a odhadnutými parametry a navíc je schopna eliminovat vliv šumu měření.

■ 4.1.4 Excitační trajektorie

Neznámé parametry identifikované postupem popsáním v sekci 4.1 jsou silně závislé na zvolené trajektorii, na které jsou měřeny průběhy dynamických veličin.

Aby tímto způsobem bylo možné správně odhadnout hodnoty všech neznámých parametrů, je potřeba s robotem vykonat pohyby po takové trajektorii, na které by byly vybudeny všechny dynamické složky robota. Trajektorie musí být zvolena tak, aby se do dynamiky pohybu promítly všechny neznámé parametry. Identifikace z nedostatečně budící (excitující) trajektorie sice také odhadne všechny neznámé parametry, model s nimi ale bude přesný pouze pro pohyby po této trajektorii nebo jejím okolí.

Ve vědeckých člancích a publikacích např. [10][14][18] se na jednotlivých osách jako excitační trajektorie doporučují trajektorie, které je možné popsat konečnou Fourierovou řadou. Jejich výhodou je, že díky vlastnostem harmonických funkcí jsou poté jednotlivé polohy, rychlosti i zrychlení rovněž kombinací harmonických průběhů. Tím je maximalizován vliv hledaných dynamických parametrů a minimalizován vliv šumu měření.

Protože se průmyslové manipulátory používají převážně pro polohování, jejich řídicí systémy zpravidla neumožňují na osách provádět čistě harmonické průběhy. Řídicí systém robota KUKA KR5 Arc umožňuje zadat požadovanou trajektorii dvěma hlavními způsoby. První způsob je zadání trajektorie jako sady požadovaných poloh os, kterých musí osy dosáhnout a rychlosti/zrychlení, s jakými se má tento pohyb vykonat. Druhou možností je zadání požadovaných poloh a rychlostí koncového efektoru v kartézských souřadnicích. Řídicí systém následně sám tyto zadané polohy aproximuje hladkou trajektorií.

Z tohoto důvodu je nutné robotu poskytnout sérii bodů popisujících harmonický průběh. Výsledná trajektorie robota je poté pouze aproximací harmonického průběhu.

■ 4.2 Postup identifikace

Při identifikaci parametrů robota KUKA KR5 Arc se postupovalo způsobem popsáním výše v sekci 4.1.3.

Pomocí nástroje ReDySim byla vygenerována soustava šesti rovnic dynamiky robota. Protože ReDySim v rovnicích neuvažuje tření na jednotlivých osách, bylo nutné toto tření do vygenerovaných rovnic ručně doplnit. Výsledná soustava rovnic se poté převedla do maticového tvaru lineárního vůči neznámým dynamickým parametrům (rovnice 4.1).

Za vektor P neznámých parametrů byl zvolen vektor s parametry všech

šesti os

$$P = \begin{bmatrix} I_{1x} & I_{1y} & I_{1z} & \cdots & I_{6x} & I_{6y} & I_{6z} \\ m_1 & m_1 d_{1x} & m_1 d_{1y} & m_1 d_{1z} & \cdots & m_6 & m_6 d_{6x} & m_6 d_{6y} & m_6 d_{6z} \\ f_{v1} & f_{c1} & \cdots & f_{v6} & f_{c6} \end{bmatrix}^T$$

Do matic $H(\ddot{\theta}(t), \dot{\theta}(t), \theta(t))$ a $T(t)$ se dosadily jednotlivé polohy os, úhlové rychlosti, úhlová zrychlení a momenty sil naměřené v různých časech na identifikační trajektorii. Vektor neznámých parametrů P se poté vypočítal z rovnice 4.2 metodou nejmenších čtverců.

Protože jsou dynamické rovnice robota silně nelineární, může se stát, že řešitel metody nejmenších čtverců nenalezne globálně optimální řešení, ale skončí v některém z lokálních minim. Je také možné, že řešitel nalezne řešení, které bude správně matematicky, fyzikálně ale nebude dávat smysl (záporné hmotnosti ramen, apod.). Z tohoto důvodu je vhodné nějakým způsobem omezit prostor, ve kterém se má řešení hledat.

V této práci byl pro řešení metody nejmenších čtverců v MATLABu použit solver `lsqlin`, který umožňuje specifikovat hranice, ve kterých se má hledat řešení. První z omezujících podmínek bylo, že všechny hmotnosti a momenty setrvačnosti mají mít kladné hodnoty. Dále se nastavilo omezení na hledané polohy těžiště ramen tak, aby tato těžiště neležela mimo fyzický objem ramen. Posledním z požadovaných omezení bylo nastavení přesných hmotností ramen, které bylo možné dohledat ve zdrojových datech robotu.

4.2.1 Identifikační trajektorie

Protože je prostor kolem robotu omezen, není možné s robotem provádět pohyby v jeho plném rozsahu. Proto tomu bylo nutné přizpůsobit identifikační trajektorii. Identifikační trajektorie byla vytvořena složením několika nezávislých trajektorií.

V první části trajektorie se pohybovalo pouze s posledními třemi osami (osa 6, osa 5 a osa 4). Ostatní osy byly v pevně zafixované pozici. Nejprve se opakovaně pohybovalo pouze poslední šestou osou v jejím maximálním možném rozsahu v obou směrech otáčení. K tomu se následně přidal obdobný pohyb páté osy a nakonec se stejným způsobem přidal i pohyb čtvrté osy. Tímto se pokryla maximální možná škála pohybů posledních tří os.

Následovala část trajektorie pro identifikaci parametrů prvních tří os. U těchto os je situace zkomplikovaná tím, že osa 2 a osa 3 mají vždy vzájemně rovnoběžné osy otáčení (viz obrázek 2.2). Proto je obtížné nezávisle identifikovat některé z jejich parametrů. Příkladem může být identifikace momentů setrvačnosti vzhledem k osám kolmým na osy jejich rotace. Osou 3 není možné kolem těchto os otáčet, aniž by se zároveň kolem stejné osy neotáčela osa 2 a naopak.

V tomto případě se postupovalo nejprve opakovaným pohybem osy 3 v jejím plném rozsahu a zafixováním os 1 a 2. Následně se zafixovala osa 3 a stejným způsobem se pohybovalo osou 2. Tímto se pokryly pohyby nezávislé na rotaci kolem osy 1.

Trajektorie závislá na pohybu osy 1 byla vytvořena tak, že se nejprve několikrát pohybovalo osou 1 s rameny os 2 a 3 pevně zafixovanými ve vertikální poloze. Poté se stejné pohyby provedly s ramenem osy 3 v horizontální poloze a následně s oběma rameny 2 a 3 v horizontální poloze.

Výsledná identifikační trajektorie byla vytvořena spojením těchto tří trajektorií v jednu. Nástroj TRACE přitom byl nastaven tak, aby prováděl měření poloh, úhlových rychlostí, úhlových zrychlení, momentů sil a proudů na všech osách.

4.3 Skript pro MATLAB

Pro účely identifikace robota KUKA KR5 Arc byl vytvořen skript pro použití v MATLABu, který umožňuje vytvoření dynamického modelu, načtení změřených trajektorií, identifikaci neznámých parametrů, simulaci a srovnání výsledků a analýzu vlivu nepřesnosti odhadnutých parametrů na přesnost modelu.

Skript je rozdělen na několik po sobě jdoucích podprogramů, které je možné spouštět vcelku nebo po jednotlivých částech. Komentáře ve skriptu jsou psány v anglickém jazyce pro případné rozšíření jeho použití.

První část je univerzální pro libovolného sériového robota s rotačními osami. Definují se zde základní parametry robotu, jako je počet os, délky jednotlivých ramen, převodní poměry převodovek a počet měřených veličin. Dále se zde zadávají parametry motorů, mezi něž patří momentové konstanty a odpory a indukčnosti vinutí.

Další část je částečně závislá na použitém robotu. V této části je importována změřená trajektorie robota. Robot KUKA KR5 Arc používá k měření trajektorií nástroj TRACE. Tento nástroj ukládá změřená data ve speciální struktuře ve formátu .r64. Tu je potřeba rozložit na jednotlivé měřené složky a ty dále vynásobit převodními koeficienty měření. Jiné typy robotů, obzvláště roboty od jiných výrobců budou pravděpodobně mít změřené trajektorie ukládány jiným způsobem a v jiných formátech. Proto je potřeba, v případě použití jiného robotu, skript upravit nebo doplnit pro správné importování těchto dat. Výsledkem této části je trojrozměrná matice naměřených trajektorií pro jednotlivé osy a veličiny.

Následující části jsou již zcela nezávislé na robotické platformě a jsou univerzální pro použití pro libovolného robota.

Kapitola 5

Identifikované parametry

Postupem popsaným v sekci 4.2 byly identifikovány všechny neznámé parametry. Identifikované parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1. V následující tabulce 5.2 jsou pro srovnání vypsané hodnoty identifikované z 3D modelu robotu (viz sekce 4.1.2). Hodnoty hmotností, momentů setrvačnosti a poloh těžiště v tabulkách jsou uvedeny v základních jednotkách SI. Koeficienty tření jsou bezrozměrné.

Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1	0	0	3.963	0	0	0	0	93.540	6.473
2	0.197	3.078	1.967	0.301	0.034	0	19.30	93.240	21.107
3	0.490	3.025	0.799	-0.038	-0.133	-0.006	26.47	24.510	2.486
4	1.737	0.509	0.637	-0.037	0.024	-0.027	7.41	7.235	1.594
5	0.105	0.353	0.218	0.030	0	-0.140	2.53	1.863	1.033
6	0.179	0.206	0.027	0	0	0.133	0.60	1.148	0.396

Tabulka 5.1: Tabulka parametrů identifikovaných z rovnic

Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1	0.322	0.467	0.478	0.091	0.067	0.006	26.98	-	-
2	0.541	0.552	0.044	0.333	0.002	0.039	15.92	-	-
3	0.775	0.750	0.210	-0.032	-0.008	-0.034	25.85	-	-
4	0.010	0.020	0.024	0	0.109	-0.008	4.09	-	-
5	0.002	0.004	0.004	0	-0.01	0	1.62	-	-
6	0.00006	0.00003	0.00003	0	0	0.111	0.02	-	-

Tabulka 5.2: Tabulka parametrů identifikovaných z 3D modelu

Porovnáním hodnot v obou tabulkách je patrné, že se většina parametrů, s výjimkou hmotností ramen, poměrně výrazně liší. Dalším rozdílem je, že z 3D modelu není možné získat informace o koeficientech tření v jednotlivých osách, zatímco identifikace z rovnic se třením počítá. Vliv tření na přesnost modelu je analyzován v další části.

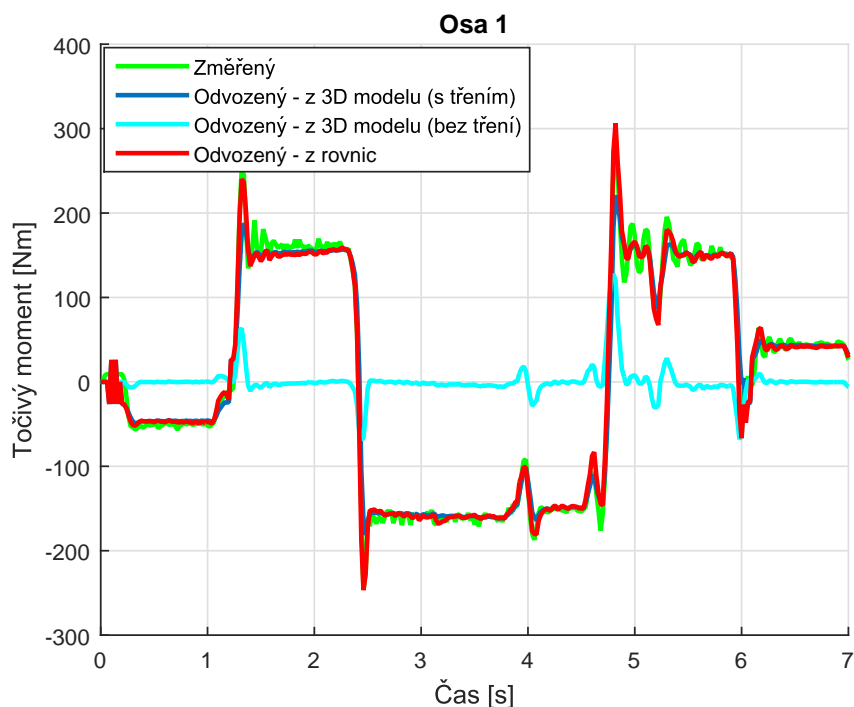
5.1 Simulace odvozených parametrů

Na následujících obrázcích (obr. 5.1a až 5.1f) jsou odsimulované průběhy točivých momentů s odvozenými parametry všech šesti os. Jsou v nich odsimulované průběhy s parametry odvozenými pomocí rovnic a z 3D modelu.

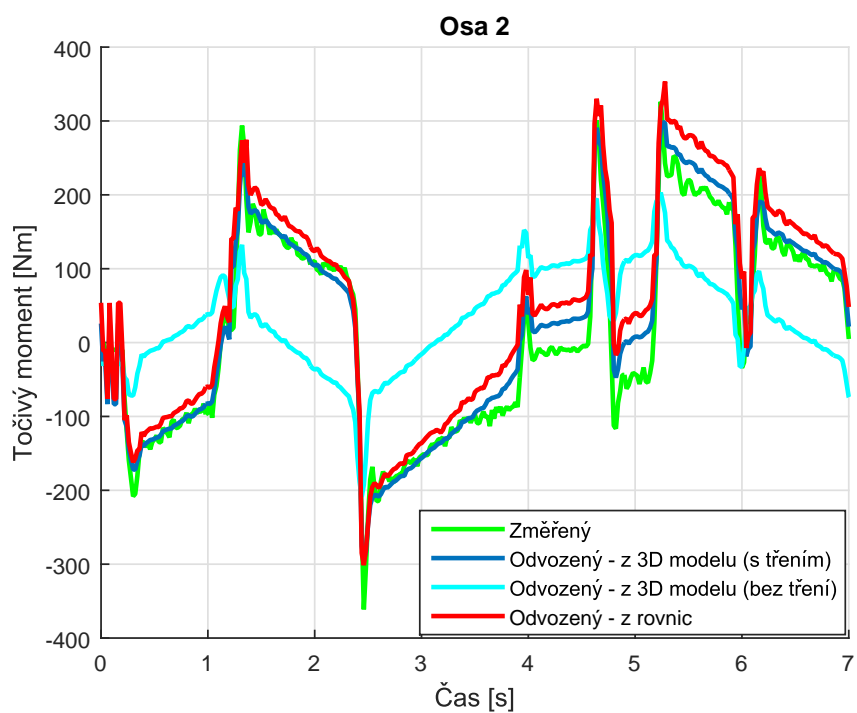
Simulace je provedena tak, že se nejprve s robotem vykonal pohyb po určité trajektorii. Přitom byly měřeny průběhy poloh, úhlových rychlostí, úhlových zrychlení a momentů sil. Polohy, rychlosti a zrychlení byly následně dosazeny do odvozených identifikovaných modelů a výsledné momenty sil byly porovnány se změřenými.

Protože z 3D modelu není možné získat koeficienty tření os, je zde možnost uvažovat tyto koeficienty jako nulové a tím je v modelu zanedbat. Tento model je ale velmi nepřesný (viz průběhy 5.1). Na průbězích je vidět, že vychází opravdu velmi vysoké odchylky od naměřených dat. Tření os hraje v dynamice robota významnou roli, proto ho není možné tímto způsobem zanedbat.

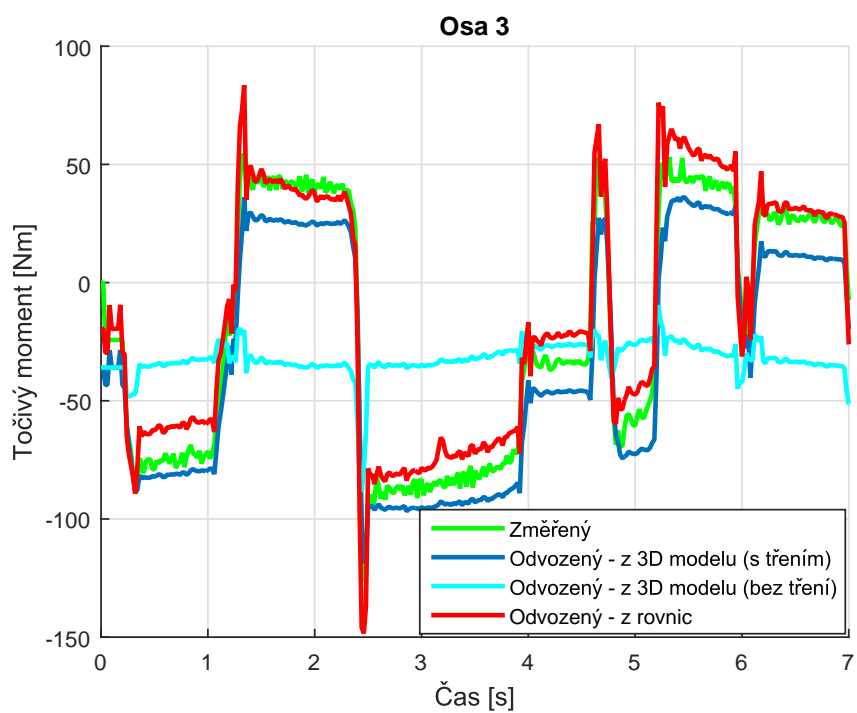
Odvozené parametry z 3D modelu je možné využít tak, že se budou v dynamických rovnicích uvažovat jako známé a z rovnic se odvodí pouze neznámé koeficienty tření. Na průbězích níže jsou pro srovnání odsimulované průběhy s parametry získanými tímto způsobem.



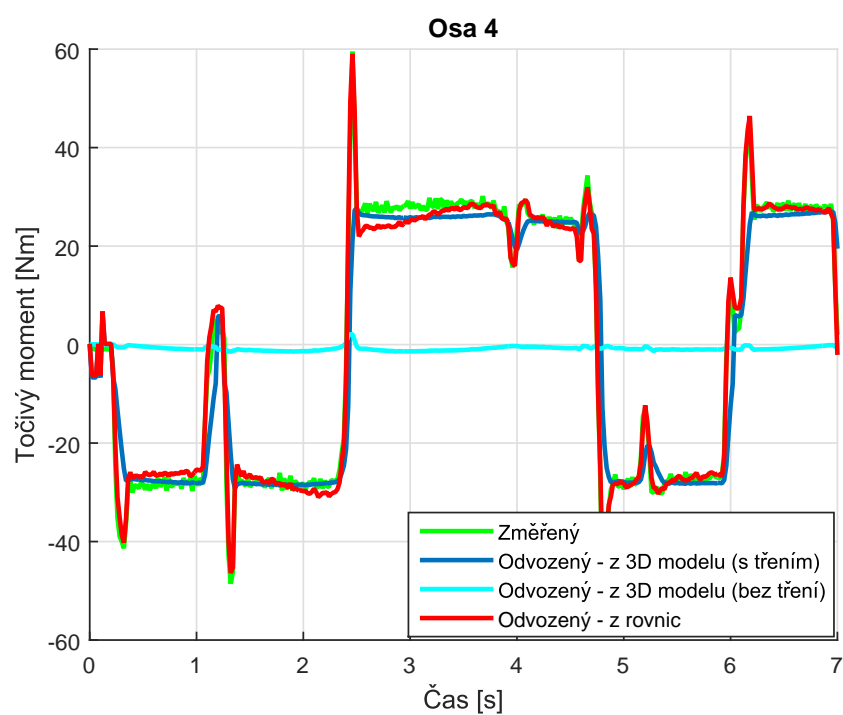
(a) : Osa 1



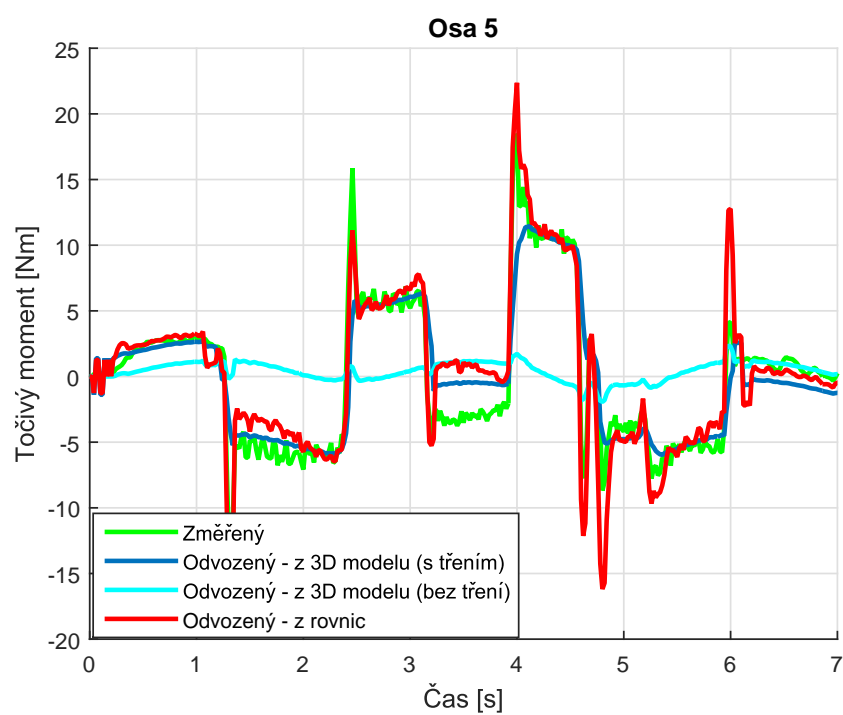
(b) : Osa 2



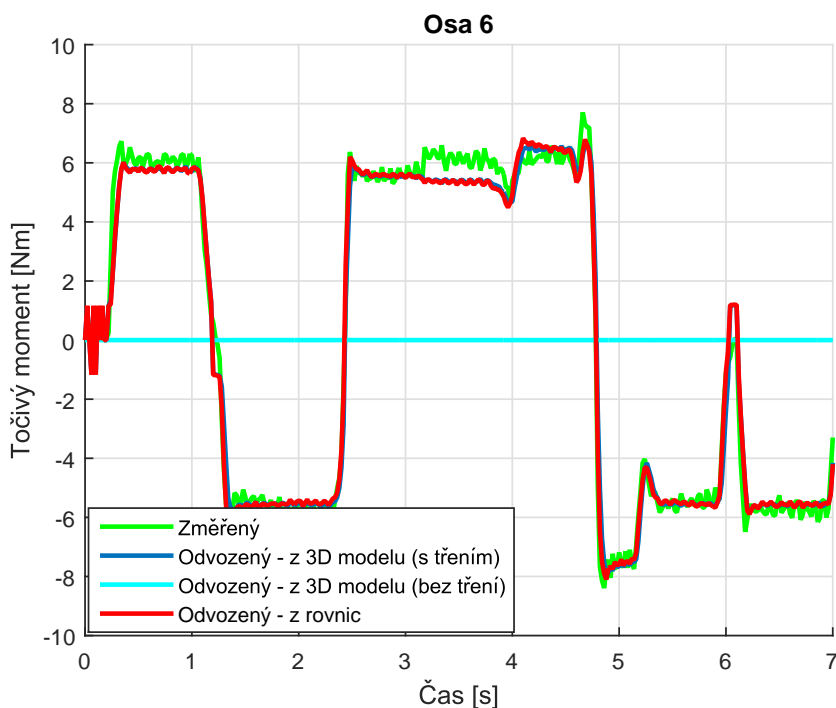
(c) : Osa 3



(d) : Osa 4



(e) : Osa 5

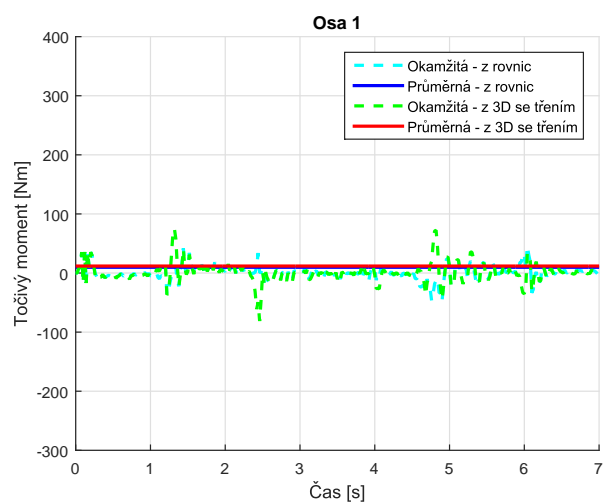


(f) : Osa 6

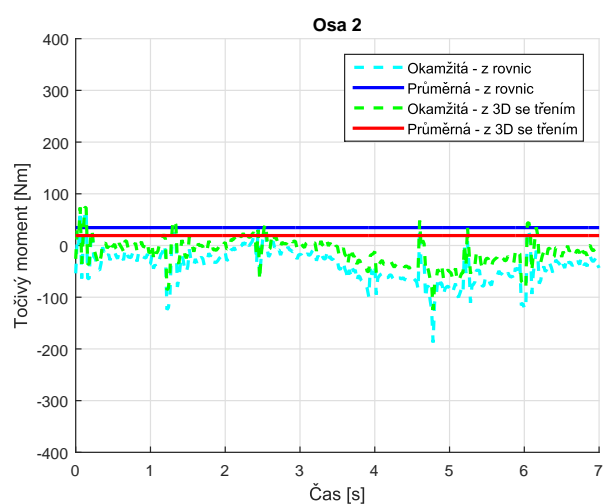
Obrázek 5.1: Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry

Z výše uvedených průběhů je patrné, že v případě zanedbání tření os je získaný model robota nepoužitelný. Nejlepších výsledků tento model dosahuje na ose 2 kde mají na dynamiku kromě tření velký vliv také hmotnosti a polohy těžišť následujících ramen, jejichž hmotnost osa 2 nese. Naopak například pro osy 4 a 6 je vliv ostatních parametrů vůči tření na této trajektorii zanedbatelný, proto jsou predikované momenty na těchto osách téměř nulové. Z toho důvodu se nadále již model se zanedbaným třením neuvažuje.

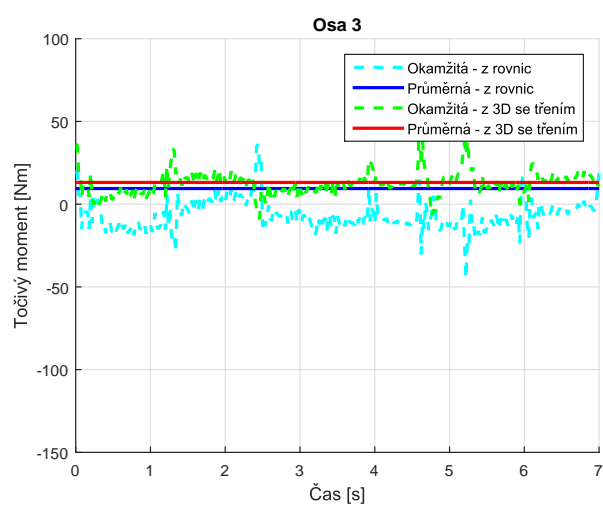
Naopak model s identifikovanými parametry z rovnic a z 3D modelu se třením poskytuje poměrně přesné předpovědi. Ve většině případů jsou predikované hodnoty z modelu téměř totožné s těmi změřenými. Na následujících obrázcích (5.2a až 5.2f) je srovnání přesností obou modelů. V grafech je znázorněna okamžitá a průměrná odchylka mezi modely a měřením.



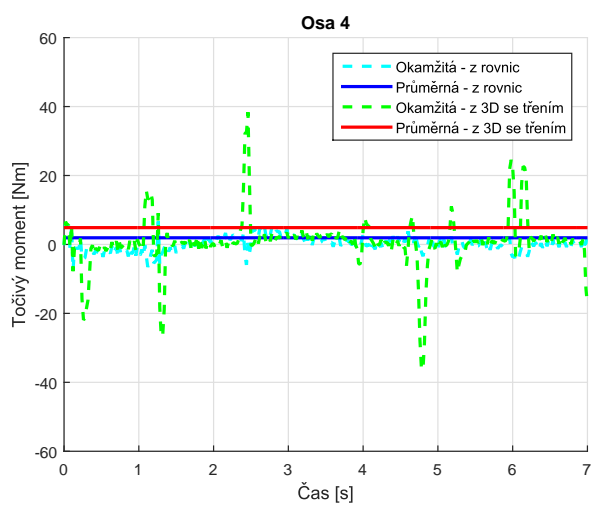
(a) : Osa 1



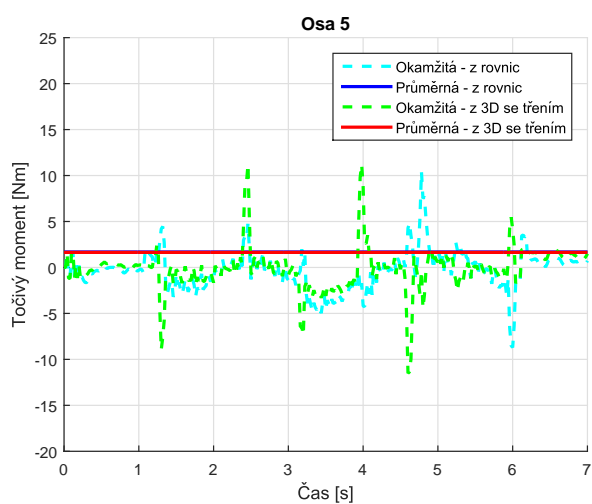
(b) : Osa 2



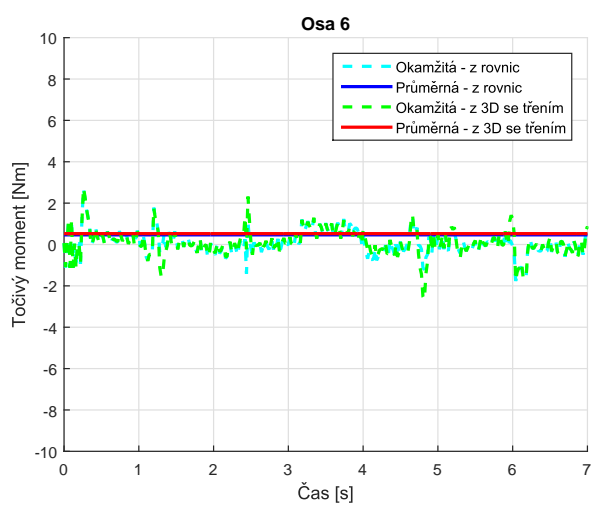
(c) : Osa 3



(d) : Osa 4



(e) : Osa 5



(f) : Osa 6

Obrázek 5.2: Srovnání odchylek modelů a měření

Z grafů je patrné, že oba modely jsou podobně přesné. Na osách 1, 5 a 6 se průměrné odchylky obou metod překrývají. Z průběhů je možné také vypočítat, že model identifikovaný z rovnic dokáže lépe modelovat ostré špičky na momentech. Pro přesnější srovnání jsou v tabulce 5.3 uvedeny přesné hodnoty průměrných odchylek na jednotlivých osách.

Osa	Z rovnic [Nm]	Z 3D modelu [Nm]
1	9,75	11,81
2	34,62	19,23
3	9,43	13,14
4	1,93	4,88
5	1,63	1,64
6	0,47	0,53

Tabulka 5.3: Srovnání průměrných odchylek modelů vůči měření

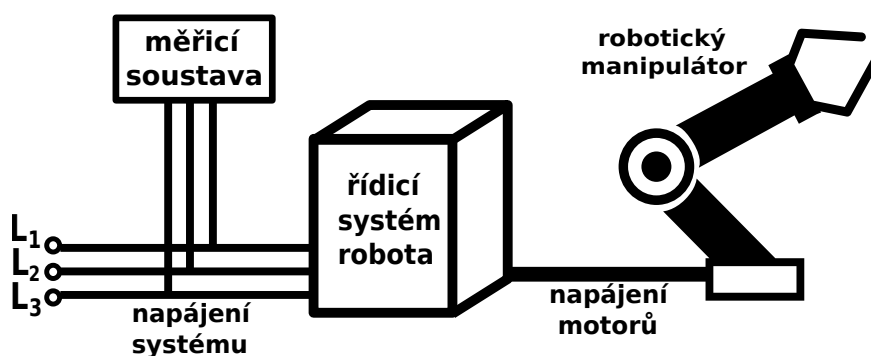
Porovnáním odchylek těchto dvou metod identifikace v tabulce 5.3 je možné říct, že obě metody dávají srovnatelné modely. Podle předpokladů má metoda identifikace z rovnic nižší odchylky od změřených hodnot na většině osách. Výjimkou je osa 2. Odchylky na osách 5 a 6 jsou prakticky stejné pro obě metody. Největší nepřesnost je na ose 2, kde model identifikovaný z 3D modelu dosahuje lepších výsledků. Důvodem větší nepřesnosti metody z rovnic může být nedostatečně excitující identifikační trajektorie pro osu 2.

Identifikace z rovnic pomocí excitační trajektorie tedy obecně dává přesnější model robota. Navíc k tomu aby metoda identifikace z 3D modelu dávala rozumně přesný model, je k němu nutné pomocí rovnic identifikovat koeficienty tření. Proto je dále pro modelování spotřeby robota použit model identifikovaný pomocí rovnic.

Kapitola 6

Měření elektrického výkonu

Správnost odvozeného a identifikovaného modelu robota je potřeba ověřit a porovnat se skutečným měřením elektrického výkonu. Měření výkonu bylo provedeno podle schématu na obrázku 7.2. Měřicí sestava je připojena na svorky napájecího vedení mezi elektrickou zásuvkou a skříní s řídicím systémem a napájením robota. Sestava je tvořena měřicí kartou WAGO-I/O-SYSTEM 750 připojenou k průmyslovému PLC Siemens S7-300 CPU 315-2PN/DP. Měřicí karta WAGO obsahuje svorky pro měření napětí a proudu v třífázové síti.



Obrázek 6.1: Schéma zapojení soustavy pro měření výkonu.

Pro účely měření výkonu robotu KUKA KR5 Arc byla karta nakonfigurována pro měření činného výkonu na každé jednotlivé fázi zvlášť. Výsledný celkový výkon je poté podle vzorce 3.15 roven součtu výkonů všech jednotlivých fází. Měření výkonu je prováděno s přesností na desetiny wattu. Vzorkovací perioda měření je 40 ms.

Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750 [[17]] je určena pro měření elektrických veličin v třífázové síti. Je navržena pro použití v průmyslovém prostředí v kombinaci s průmyslovým počítačem PLC.

Karta je opatřena svorkami pro měření napětí a proudu na každé fázi zvlášť. Měření proudu je prováděno pomocí proudového transformátoru převádějícího měřený proud na napětí.

Kartu je možné nakonfigurovat pro současné měření až čtyř elektrických veličin jako je stejnosměrné (DC) a střídané (AC) napětí, proud, výkon, frekvence, fázový posuv a další, a to pro každou fázi zvlášť. Navíc je karta schopna provádět analýzu harmonických složek signálu pro vybranou fázi a to až pro 3 vybrané harmonické složky z rozsahu 1. a 41. harmonické.



Obrázek 6.2: Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750.

Změřené veličiny posílá karta přímo na vstupy připojeného PLC, které je dále zpracovává. Měřicí karta se vstupními svorkami je na obrázku 6.2. Technické parametry a podrobnější informace o použití karty je možné nalézt v jejím manuálu [[17]].

Průmyslové PLC Siemens S7-300 CPU 315-2PN/DP [[16]] zpracovává změřená data, která jsou posílána kartou WAGO 750. PLC tato data cyklicky čte ze vstupů a převádí je do 32-bitového hexadecimálního tvaru. Následně jsou 32-bitová data rozdělena na horních a spodních 16 bitů a opatřena identifikátory.

Všechna přečtená data s příslušnými identifikátory jsou poté spojena do jedné zprávy, která je navíc ještě opatřena časovou známkou udávající čas o tom, kdy byla data vytvořena. Celá zpráva je nakonec odeslána jako jeden paket pomocí protokolu UDP v síti Profinet.

Kompletní měřicí systém a program pro sběr měřených dat a jejich odesílání v síti Profinet byl vytvořen Ing. Vojtěchem Pavlíkem v rámci jeho diplomové práce [[4]].

Programování a konfigurace PLC je prováděna pomocí nástroje TIA Portal společnosti SIEMENS. Podrobné informace k PLC S7-300 jsou k dispozici v jeho dokumentaci [[16]].

■ 6.3 Aplikace DEPO

Za účelem ukládání změřených dat byla panem Ondřejem Fialou vytvořena aplikace DEPO. Aplikace je napsaná ve skriptovacím programovacím jazyce RUBY. Spouští se pomocí příkazového řádku na osobním počítači připojeném k Ethernetové síti, ke které je připojeno i měřicí PLC.

Aplikace přijímá data odesílaná měřicím PLC přes protokol UDP. Přijatá data se poté ukládají jako dokument do databáze MongoDB, ke které je počítač připojený. Uložená data v databázi je poté možné exportovat a následně analyzovat.

Pro správnou funkci aplikace je nutné správně nastavit adresu IP měřicího PLC a číslo portu, na kterém má aplikace odesílaná data číst. Nastavení funkčnosti aplikace DEPO se provádí pomocí konfiguračního souboru. Ten obsahuje informace o IP adrese a portu na kterém má data přijímat a dále adresu, název a kolekci databáze, do které se mají data ukládat.

Protože je aplikace napsaná ve interpretovaném skriptovacím jazyce RUBY, je možné ji spouštět na libovolném operačním systému, který podporuje spouštění RUBY skriptů.

Kapitola 7

Srovnání výsledků

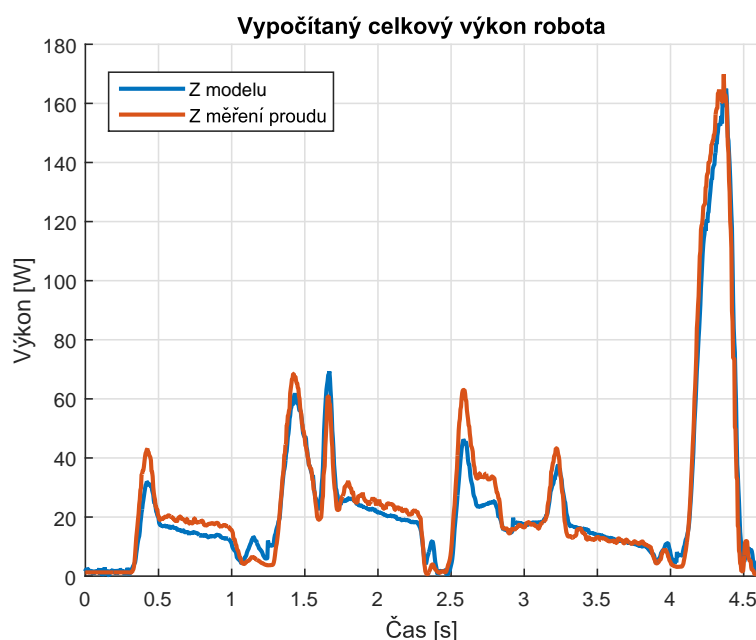
Odvozený model identifikovaný z rovnic v kapitole 5 dává do vztahu točivé momenty jednotlivých os s jejich polohami, úhlovými rychlostmi a úhlovými zrychleními (rovnice 3.4). Tento model je dále možné použít k výpočtu celkového elektrického výkonu robota (viz sekce 3.3).

Pro predikci výkonu byly vypočítané momenty sil na jednotlivých osách převedeny pomocí momentových konstant motorů na efektivní hodnoty proudů protékajících jejich vinutím. Nahrazením vinutí motorů obvodem s odporem a indukčností zapojenými v sérii (obrázek 3.2) byly z těchto hodnot proudů vypočítány hodnoty efektivního napětí na svorkách motorů. Vynásobením hodnot napětí a proudů podle rovnice 3.11 byly vypočítány průběhy elektrických výkonů na jednotlivých osách. Celkový elektrický výkon robota je poté dán součtem všech dílčích výkonů na všech osách.

7.1 Dosažitelná přesnost modelu

Momenty sil na jednotlivých osách v jsou nástroji TRACE vypočítány ze změřených proudů, podle vzorce 3.2, jejich vynásobením příslušnými momentovými konstantami. Proto v případě, že by byly parametry modelu identifikovány naprosto přesně, byl by průběh výkonu vypočítaný pomocí tohoto modelu totožný s výkonem vypočítaným z měření proudů. Výkon spočítaný pomocí těchto změřených proudů představuje maximální možnou hranici přesnosti, které je možné pomocí modelu dosáhnout.

Na obrázku 7.1 je zobrazen průběh výkonu vypočítaného z modelu a z přímého měření proudů pomocí nástroje TRACE. Je patrné, že si oba průběhy poměrně odpovídají. Střední odchylka mezi oběma průběhy je 3,82 W. Přesnost odvozeného modelu se tedy blíží maximální možné dosažitelné přesnosti modelování a identifikace z rovnic systému.



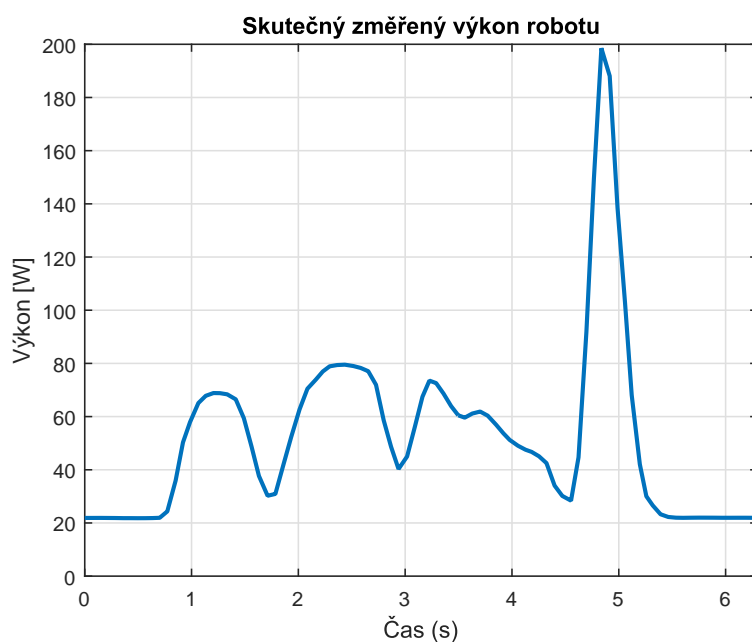
Obrázek 7.1: Srovnání vypočítaného výkonu z modelu a z měření proudu

7.2 Srovnání modelu výkonu s reálným měřením

Pro porovnání modelu pro výpočet výkonu s reálnými naměřenými hodnotami byla použita jiná trajektorie, než která byla použita pro jeho identifikaci. Tato testovací trajektorie byla vytvořena tak, aby se co nejvíce blížila typickým trajektoriím vyskytujícím se v průmyslových aplikacích. Byla vybrána trajektorie simulující montáž součástky A na povrch součástky B. Koncový efektor robota nejprve dojel z výchozí pozice na pozici, kde by se měl vyskytovat zásobník se součástkami A. Poté koncový efektor po obloukové trajektorii dojel na místo montáže součástky A a natočil se do požadovaného úhlu. Následně se vrátil zpět do výchozí pozice.

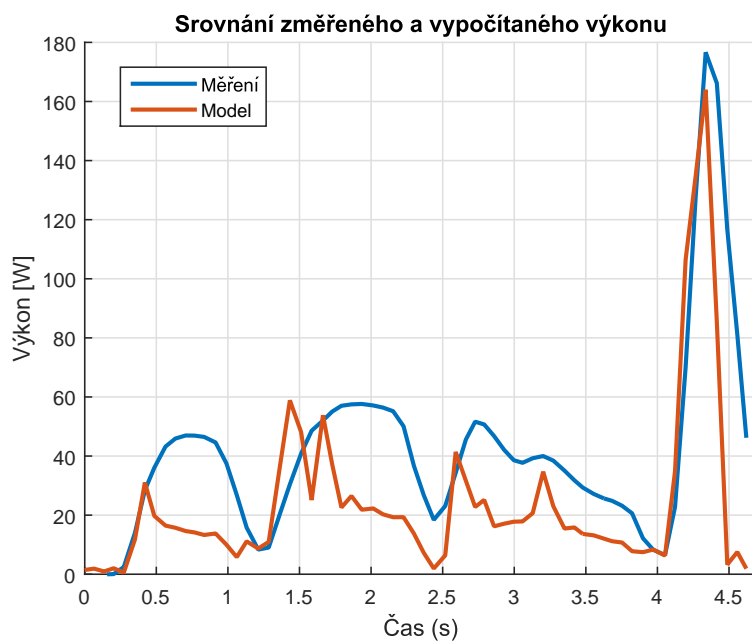
Při tomto pohybu robota byl v jeho řídicím systému spuštěn nástroj TRACE zaznamenávající průběh poloh, úhlových rychlostí a úhlových zrychlení potřebný pro model výkonu. Zároveň bylo spuštěno měřicí PLC ukládající skutečný naměřený činný výkon na napájecím vedení robota. Skutečný změřený výkon je na obrázku 7.2.

Změřené a predikované průběhy výkonu byly poté vzájemně porovnány. Aby je bylo možné mezi sebou porovnat, je nejprve nutné data upravit. První nutnou úpravou je provedení časové synchronizace mezi oběma daty. Důvodem je to, že v měřicím PLC je jiný čas než v řídicím systému robota. Měřicí PLC zaznamenává skutečný aktuální světový čas, zatímco nástroj TRACE zaznamenává čas vztahený k okamžiku spuštění měření.



Obrázek 7.2: Skutečný změřený výkon robotu

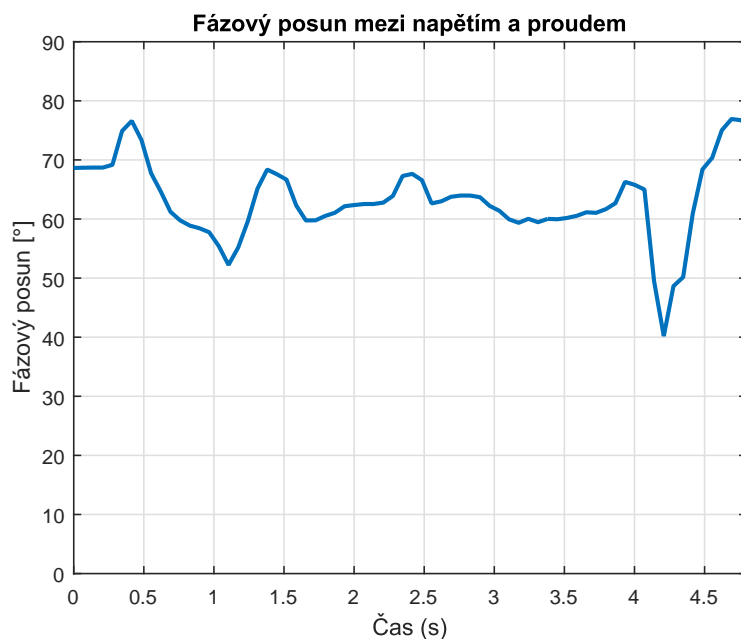
Dále je potřeba průběhy převzorkovat, protože měřicí karta má pro měření činného výkonu vzorkovací periodu 40 ms a nástroj TRACE robotu zaznamenává data s periodou 4 ms. Nakonec byla ještě od změřených dat odečtena stálá složka výkonu, která není závislá na dynamice pohybu robotu. Z obrázku je možné určit, že hodnota stálé složky výkonu je rovna 21,9 W.



Obrázek 7.3: Srovnání měření a modelu výkonu

navržena tak, aby eliminovala příliš vysoké proudové špičky za účelem snížení zátěže mechanických částí motoru.

Na obrázku 7.4 je průběh fázového posunu mezi napětím a proudem na napájecím vedení robotického systému. Tento fázový posun byl vypočítán z měření činného a zdánlivého výkonu.

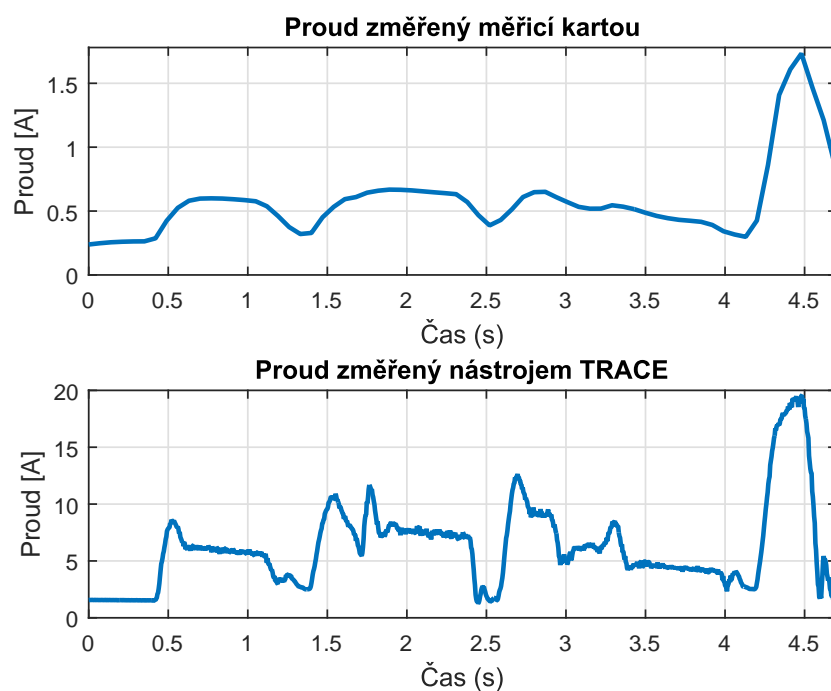


Obrázek 7.4: Fázový posun mezi napětím a proudem na napájecím vedení robotu

Z průběhu je patrné, že se fázový posun mezi napětím a proudem během pohybu robotu velmi mění. Elektroniku frekvenčních měničů proto není možné nahradit jednoduchým modelem s pasivními elektronickými prvky.

Pro srovnání je na obrázku 7.5 porovnání celkového elektivního proudu změřeného měřicí kartou WAGO-I/O-SYSTEM 750 a celkového efektivního proudu změřeného nástrojem TRACE robotu. Celkový proud měřený nástrojem TRACE je dán jako součet absolutních hodnot proudů ve všech motorech.

Z grafů je patrné, že průběh obou proudů je velmi podobný. Kromě vyšší amplitudy má proud změřený nástrojem TRACE má ale mnohem ostřejší hrany a proudové špičky. Protože frekvenční měniče nejsou ideálními zdroji elektrické energie, je možné předpokládat, že při tak vysokých, ostrých a rychlých proudových špičkách může docházet k poklesu napájecího napětí motorů. Výsledný elektrický výkon by poté tak ostré špičky neobsahoval. Toto tvrzení ale není možné ověřit měřením, protože nástroj TRACE neumožňuje měření napájecích napětí motorů.

**Obrázek 7.5:** Srovnání celkových změřených proudů

Dále možné předpokládat, že v rozvaděči celého robotického systému jsou kromě frekvenčních měničů také další elektronické prvky sloužící k stabilizaci napájení jednotlivých jeho částí.

Z těchto důvodů by pro snížení odchylky mezi změřeným a predikovaným výkonem bylo potřeba model výkonu robotu doplnit o modely frekvenčních měničů napájejících motory robotu a dalších prvků v jeho rozvaděči. Druhou možností je upravit způsob měření reálného výkonu tak, aby měřil výkony přímo na motorech robotu.

Kapitola 8

Vliv odchylek v parametrech na přesnost modelu

Pro vytvoření modelu spotřeby elektrické energie průmyslového robota je potřeba identifikovat mnoho neznámých parametrů. V případě robota KUKA KR5 Arc se jedná o celkem 54 neznámých parametrů. Ne všechny parametry ale ovlivňují dynamiku robota a s ní spojenou spotřebu elektrické energie stejně. Některé parametry mají mnohem větší vliv než jiné. Pro vytvoření co nejpřesnějšího modelu je proto vhodné tyto parametry identifikovat co nejpřesněji.

V této sekci je provedena analýza vlivu odchylek v jednotlivých identifikovaných parametrech na přesnost modelu. Dynamický model robota je velmi nelineární. Proto není pro analýzu odchylek parametrů možné použít žádnou z lineárních metod, jako je například určení přenosu ze změny parametru na výstupní výkon nebo simulace systému s jednoduchým zvětšením/zmenšením parametrů.

Z tohoto důvodu je analýza vlivu odchylek v hodnotách parametrů na přesnost energetického modelu robota provedena použitím metody Monte Carlo.

8.1 Metoda Monte Carlo

Metody Monte Carlo jsou založeny na vykonání mnoha opakovaných experimentů nebo simulací s náhodně generovanými vstupními parametry za účelem získání numerických výsledků [[8]]. Obdrženou sadu výsledků je poté možné analyzovat analytickými nebo stochastickými metodami. Základní myšlenkou metod Monte Carlo je použití nahodilosti k řešení problémů, které mohou být v principu deterministické.

Tyto metody jsou používány k řešení problémů, u kterých je obtížné nebo dokonce nemožné použít některou z analytických metod. Nejčastěji jsou tyto

metody používány pro simulace systémů s mnoha stupni volnosti (kapaliny, systémy s rozprostřenými parametry, propojené systémy), výpočet vícerozměrných určitých integrálů, vyhodnocování rizik v ekonomii a mnoho dalších.

Analýza vlivu odchylek v identifikovaných parametrech pomocí metody Monte Carlo byla provedena tak, že ke každému z identifikovaných parametrů P_i byla náhodně přiřčena hodnota z rozsahu $p \in [-P_i, P_i]$, se kterou byla provedena simulace a vypočítaná střední odchylka mezi simulací a změřenými průběhy. Pro každý parametr bylo takto provedeno 200 simulací, pokaždé s náhodně vygenerovanou hodnotou. Ostatní hodnoty parametrů zůstaly nezměněné.

Po vykonání simulací pro všechny parametry bylo vyhodnoceno, při jakých odchylkách parametrů byl největší rozdíl mezi simulovaným a změřeným průběhem.

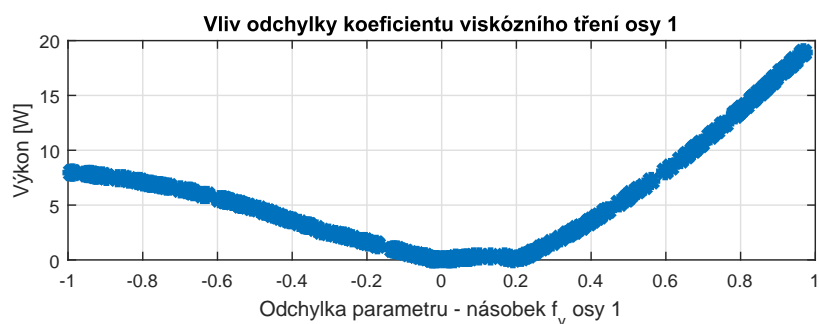
8.2 Vyhodnocení

Vyhodnocené maximální odchylky mezi simulacemi a změřenými průběhy jsou uvedeny v tabulce 8.1. Hodnoty v tabulce jsou vztaženy ke střední odchylce mezi výkonem vypočítaným pomocí identifikovaného modelu a určeným pomocí měření proudů (viz sekce 7.1). Hodnoty udávají, o kolik se zvýší odchylka ve wattech mezi modelem a měřením vůči původnímu identifikovanému modelu.

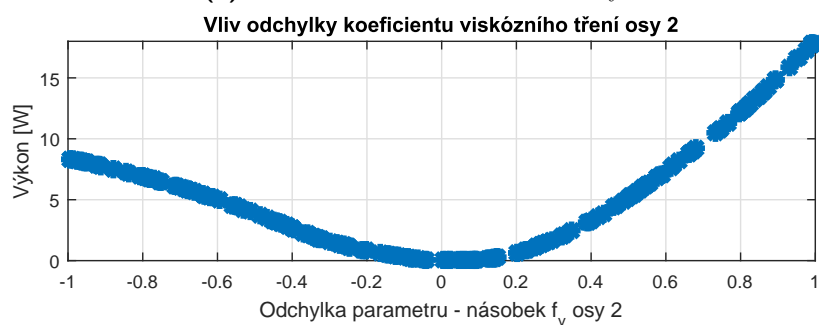
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1	0	0	0.349	0	0	0	0	18.960	0.612
2	0.004	0.046	0.319	1.016	0.103	0	0.022	17.824	0.506
3	0.003	0.171	0.726	2.320	0.824	0.087	8.202	0.568	0.053
4	0.811	0.043	0.041	0.586	0.055	0.047	7.963	0.094	0.002
5	0.033	0.018	0.029	0.427	0.004	0.044	1.394	0.078	0.021
6	0.065	0.027	0.002	0	0	0.016	0.250	0	0

Tabulka 8.1: Tabulka maximálních dosažených odchylek vzhledem k odchylkám v parametrech

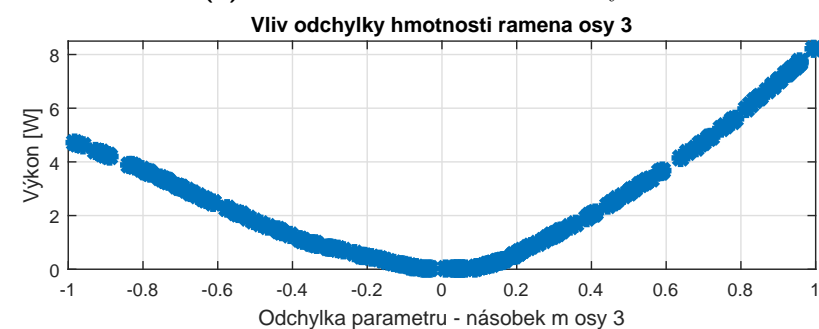
Z hodnot v tabulce je možné vypočítat, že největší vliv na přesnost modelu mají koeficienty viskózního tření (f_v) osy 1 a 2 a hmotnosti ramen (m) os 3 a 4. Na obrázcích 8.1a až 8.1d jsou znázorněny vlivy jednotlivých odchylek těchto parametrů na celkovou odchylku modelu vůči měření. Na svislé ose je odchylka, o kterou se zvýší střední odchylka modelu vůči měření v závislosti na změně parametru. Na vodorovné ose je pak odchylka v identifikovaném parametru.



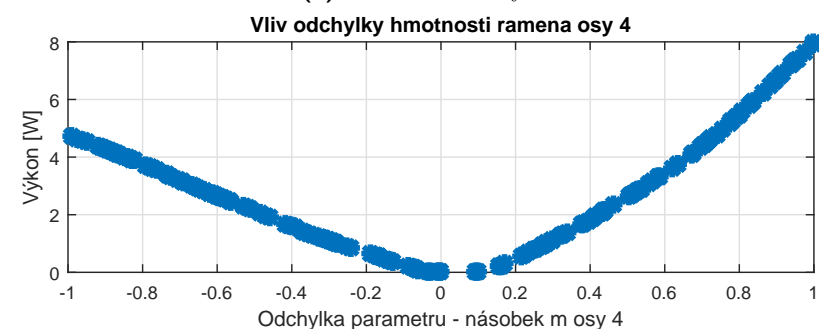
(a) : Koeficient viskózního tření osy 1



(b) : Koeficient viskózního tření osy 2



(c) : Hmotnost osy 3



(d) : Hmotnost osy 4

Obrázek 8.1: Vliv odchylek vybraných parametrů na přesnost modelu

Z obrázků je patrné, že metoda identifikace parametrů (viz sekce 4.1.3) našla optimální řešení, protože zvýšení i snížení identifikovaných parametrů vede na větší střední odchylku mezi modelem a měřením.

Největší vliv na přesnost modelu mají tedy koeficienty tření, hmotnosti a polohy těžišť prvních tří os. Z toho důvodu je vhodné identifikovat tyto parametry co nejpřesněji.

Kapitola 9

Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby

Data o měření energetické energie jsou pro pozdější analýzu nepřetržitě ukládána pomocí aplikace DEPO (kapitola 6.3) do databáze. Protože jsou data ukládána jako dlouhý řetězec znaků bez žádné pevné struktury a s proměnlivou délkou, byla pro tyto účely vybrána databáze MongoDB.

9.1 Databáze MongoDB

MongoDB je bezplatná otevřená a platformě nezávislá databáze. Na rozdíl od většiny jiných známých typů databází pracujících s SQL příkazy, se řadí mezi takzvané NoSQL databáze. Data v databázi nejsou ukládána jako tabulky se vzájemnými relacemi, ale vkládají se jako dokumenty ve speciálním formátu podobnému formátu JSON se schématy. Díky tomu je možné do databáze vkládat data různých formátů a délek bez potřeby vytváření speciálních struktur.

K databázi je možné přistupovat pomocí příkazů zadávaných do integrovaného terminálu, nástrojů s grafickým uživatelským rozhraním nebo použitím uživatelem vytvořených skriptů. Ke komunikaci s databází MongoDB je také možné použít sady knihoven, které jsou k dispozici pro většinu rozšířených programovacích jazyků jako jsou C, C++, Java, Python, RUBY a mnoho dalších.

9.2 Aplikace MongoDB data exporter

Aby bylo možné dále uložená data analyzovat, například po dlouhodobém měření spotřeby, je potřeba je z této databáze získat v nějakém vhodném formátu, který je možné importovat do nástrojů jako MATLAB, Excel, OpenOffice.org

Aplikace MongoDB data exporter slouží jako správce databáze dlouhodobého měření energetické spotřeby robotické buňky. Kromě exportu naměřených dat ve zvoleném formátu, umožňuje vytváření záloh dat, jejich správu a čištění.

MongoDB data exporter se spouští pomocí terminálu nebo příkazového řádku. Pro jeho ovládání je použito textové uživatelské rozhraní. Během běhu programu jsou uživateli kladeny otázky, na které uživatel odpovídá ano/ne. Uživatelské rozhraní je napsáno v anglickém jazyce, pro případné rozšíření použití aplikace. Ukázka textového uživatelského rozhraní je na obrázku 9.1.

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//                                     -= MongoDB data exporter -=                                     //
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//
// Current date and time:                16.4.2017    13:34:17
//
// Connected to Mongo database:                                depo
// Chosen collection to export:      kvasiny_pricna_stena
// Chosen number of threads/output files:      2
//
// Total number of items in database: 33283
//
// Counting boundaries ...
// Done.
//
//
// You are about to export 32464 items
// from the beginning
// to 17.01.04 12:15
// from collection: "kvasiny_pricna_stena"
// from database: "depo"
// into file: "C:/mongodb_program/data_export.csv"
//
// Do you want to make a backup of "kvasiny_pricna_stena"? (Y/n) n
// Backup will not be made.
//
// Do you want to start the data export (Y/n)? Y
//
// Commencing data export.
// Remaining:      0 of 32464
//
// Export finished.

```


Pro účely urychlení a zefektivnění zpracování dat, je aplikace vytvořena jako vícevláknová. Díky tomu je možné optimalizovat využití prostředků na počítačích s vícevláknovými a vícejádrovými procesory. Každému vlákně spuštěné aplikace je přidělen svůj úsek dat, které zpracovává. Tím je docíleno paralelního zpracování několika dat současně. O přidělování prostředků a synchronizaci jednotlivých vláken se stará operační systém. Jsou použita standardní POSIXová vlákna. Počet vláken si může uživatel zvolit sám při spuštění aplikace. Aplikace podporuje až 16 vláken.

Uživatel má dále možnosti zvolit si časový úsek, ze kterého chce data exportovat. Čas a datum od kterého a do kdy chce uživatel data exportovat se zadává s přesností na minuty.

Data jsou standardně exportována ve formátu CSV, ale je možné použít i jiné textové formáty. Název souboru si volí uživatel. K názvu jsou dále přidány údaje o časovém úseku ze kterého jsou data exportována.

Veškerá konfigurační data jako je adresa a název databáze, použitá kolekce, počet použitých vláken, název a formát výstupního souboru pro extrakci dat a časový úsek exportovaných dat jsou čtena z textového konfiguračního souboru. Uživatel má možnost při spuštění aplikace definovat umístění a název tohoto konfiguračního souboru.

Aby bylo možné aplikaci používat v prostředí MS Windows je nezbytné k aplikaci přiložit dynamicky linkované knihovny (DLL) potřebné pro funkci POSIXových vláken a knihoven pro práci s databází MongoDB. Tyto knihovny jsou distribuovány společně s programem.

Aplikace obsahuje standardní nápovědu (help), kterou je možné spustit použitím parametru -h při spuštění aplikace. Popis funkce a použití aplikace MongoDB data exporter je popsána v příloze ??.



Kapitola 10

Závěr



10.1 Výsledky práce



10.2 Práce do budoucna



Reference

- [1] Abdullah Aamir Hayat, Vishal Abhishek, Subir. K. Saha. - Dynamic Identification of Manipulator: Comparison between CAD and Actual Parameters. 2015.
- [2] Akeel Othman, Květoslav Belda, Pavel Burget. - Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2015.
- [3] Doc. Ing. Pavel Souček, Ing. Antonín Bubák. - Vysoce dynamické pohony posuvů obráběcích strojů. *ČVUT v Praze, fakulta strojní, Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, Společnost pro obráběcí stroje*, 2002.
- [4] Ing. Vojtěch Pavlík. Diplomová práce. *Měření a řízení spotřeby elektrické energie na výrobních linkách*, 2004. URL https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/e/e2/Dp_2014_pavlik_vojtech.pdf.
- [5] Ivan Virgala, Peter Frankovský, Mária Kenderová. - Friction Effect Analysis of a DC Motor. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2013.
- [6] KUKA Roboter GmbH. - KUKA KR5 ARC - Specifications. 2016. URL http://www.kuka-robotics.com/res/sps/48ec812b-1b29-4789-8ac2-598aff70abc0_Spez_KR_5_arc_en.pdf.
- [7] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. - Robot Modeling and Control - 1st EDITION. *John Wiley & sons, inc.*, 2005.
- [8] Masayuki Yano, James Douglass Penn, George Konidakis, Anthony T Patera. - Math, Numerics, & Programming (for Mechanical Engineers). *MIT OpenCourseWare*, 2013.
- [9] MongoDB C Driver. 2017. URL <http://mongoc.org/>.

- [10] Ngoc Dung Vuong, Marcelo H. Ang Jr. - Dynamic Model Identification for Industrial Robots. 2009.
- [11] prof. Ing. Ivan Zemánek, CSc. - Studijní materiály k předmětu A3B31EOP – Elektrické obvody a prvky. 2002.
- [12] Recursive Dynamics Simulator (ReDySim). 2017. URL <http://www.redysim.co.nr/>.
- [13] RoboAnalyzer. 2017. URL <http://www.roboanalyzer.com/>.
- [14] R. van der Aalst. - Dynamic identification of a Mitsubishi PA-10 robotic manipulator. 2008.
- [15] Seyed Mahdi Hashemi. - Parameter identification of a robot arm using separable least squares technique. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2009.
- [16] SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP - Datasheet. 2017. URL <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7315-2EH14-0AB0>.
- [17] WAGO-I/O-SYSTEM 750 - Manuál. 2017. URL http://www.wago.com/wagoweb/documentation/750/eng_manu/modules/m07500494_00000000_0en.pdf.
- [18] Wenxiang Wu, Shiqiang Zhu, Xuanyin Wang and Huashan Liu. - Closed-loop Dynamic Parameter Identification of Robot Manipulators Using Modified Fourier Series. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012.