

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
Obor: Systémy a řízení
Studijní program: Kybernetika a robotika
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. Sciacivco, 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 robotu. Tento model je následně použit k predikci jeho energetické spotřeby. V první části je představen robotický systém, který je předmětem modelování. Poté je popsán způsob měření elektrického výkonu a popsána vytvořená aplikace pro přípravu dat dlouhodobého měření spotřeby elektrické energie. V další části jsou nastíněny způsoby odvození dynamických rovnic robota. Nasleduje kapitola zabývající se různými způsoby identifikace a jejich vzájemným srovnáním. V následující 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. V poslední části se práce zabývá analýzou vlivu odchylek identifikovaných parametrů na přesnost modelu.

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 is an introduction of a robotic system to be modelled. Then the way of measurement of electrical power and an application for preparation of data of long-term measurement of energy consumption is described. In the next 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. Finally, there is a description of analysis of influence of deviations in identified parameters on model precision.

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

Obsah

1 Úvod	1		
1.1 Motivace	1		
1.2 Očekávaný přínos	2		
2 Robotický systém	3		
3 Měření elektrického výkonu	5		
3.1 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750	6		
3.2 PLC Siemens S7-300	6		
3.3 Aplikace DEPO	7		
4 Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby	9		
4.1 Databáze MongoDB	9		
4.2 Aplikace MongoDB data exporter	9		
5 Dynamický model	13		
5.1 Pohybové rovnice	13		
5.2 Tření	15		
5.3 Elektrický výkon a spotřeba elektrické energie	16		
5.3.1 Elektrický výkon v třífázové soustavě	17		
5.3.2 Elektrický výkon robotu	18		
5.4 Solver ReDySim	20		
5.5 Modifikované DH parametry robotu	20		
6 Identifikace systému	23		
6.1 Způsoby identifikace	23		
6.1.1 Přímé měření součástí robota	23		
6.1.2 Použití 3D modelu	24		
6.1.3 Analytické rovnice	25		
6.1.4 Excitační trajektorie	27		
6.2 Postup identifikace	27		
6.2.1 Identifikační trajektorie	28		
6.3 Identifikační skript pro MATLAB	29		
7 Identifikované parametry	33		
7.1 Simulace odvozených parametrů	34		
8 Srovnání výsledků	41		
8.1 Dosažitelná přesnost modelu	41		
8.2 Srovnání modelu výkonu s reálným měřením	42		
8.3 Analýza odchylek	44		
9 Vliv odchylek v parametrech na přesnost modelu	47		
9.1 Metoda Monte Carlo	47		
9.2 Vyhodnocení	48		
10 Závěr	51		
10.1 Práce do budoucna	52		
Reference	53		
A Návod k aplikaci MongoDB data exporter	55		
A.1 Kompilace	55		
A.2 Použití	55		

Obrázky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [7].	3	8.3 Srovnání měření a modelu výkonu	43
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [7].	4	8.4 Fázový posun mezi napětím a proudem na napájecím vedení robota	45
3.1 Schéma zapojení soustavy pro měření výkonu.	5	8.5 Srovnání celkových změřených proudů	46
3.2 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750.	6	9.1 Vliv odchylek vybraných parametrů na přesnost modelu . . .	49
3.3 Diagram zpracování dat měření výkonu.	7		
4.1 Ukázka prostředí aplikace MongoDB data exporter.	10		
4.2 Diagram aplikace MongoDB data exporter.	11		
5.1 Model tření na osách robota . . .	16		
5.2 Elektrické schéma vinutí synchronního motoru.	19		
5.3 Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.	21		
6.1 3D model robota KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0.	24		
6.2 Diagram funkce identifikačního skriptu	30		
7.1 Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry	37		
7.2 Srovnání odchylek modelů a měření	39		
8.1 Srovnání vypočítaného výkonu z modelu a z měření proudu	42		
8.2 Skutečný změřený výkon robota	43		

Tabulky

5.1 Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.	20
6.1 Tabulka nezáměch parametrů robota KUKA KR5 Arc.	26
7.1 Tabulka parametrů identifikovaných z rovnic	33
7.2 Tabulka parametrů identifikovaných z 3D modelu	33
7.3 Srovnání středních odchylek modelů vůči měření	40
9.1 Tabulka maximálních dosažených odchylek vzhledem k odchylkám v parametrech	48

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. K tomu je potřeba změnit pouze program. 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 [21] je možné říct, že bude tímto tempem pokračovat i v budoucnu.

Z těchto důvodů vzniká snaha o maximální možné snížení spotřeby energie a o maximální možné zefektivnění jejího využití. Snižování 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, které robot vykonával.

Modelování průmyslových robotů již bylo předmětem několika prací [8][3]. 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. V článcích [16][23] je použita identifikace dynamických parametrů z dynamických rovnic pomocí metody nejmenších čtverců. Práce [11] a [15] se zabývají identifikací touto metodou robota Mitsubishi PA-10. Tento postup identifikace přinesl poměrně přesný odhad skutečných parametrů robota, které poté bylo možné použít v jeho modelu skutečné dynamiky.

Jiným způsobem se postupuje v článcích [1] a [2], které se zabývají identifikací systému pomocí 3D modelu. Tento způsob identifikace není schopen odvodit skutečné hodnoty dynamických parametrů, ale poskytuje pouze jejich hrubý odhad. Model s takto identifikovanými parametry nepřináší přesný popis dynamiky robota, ale je jej možné použít pro účely porovnání dynamik několika různých trajektorií robota. 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

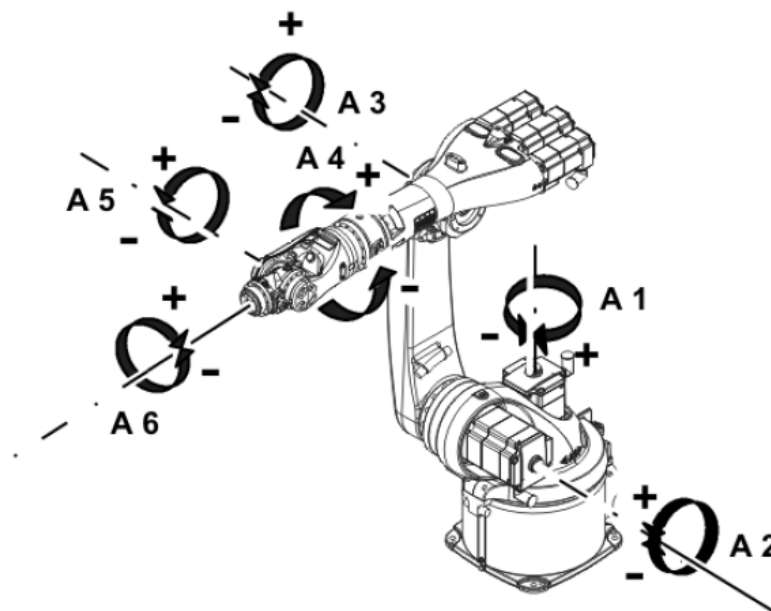
Vytvoření modelu a jeho identifikace byla provedena pro průmyslového robota KUKA KR5 Arc [7] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osový robota, který má 6 rotačních os poháněných synchronními servomotory.

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 [7].

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. Maximální rychlost koncového efektoru robotu přesahuje 5 m/s.



Obrázek 2.2: Konfigurace os robota. Převzato z [7].

K pohánění os robotu 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 robotu. 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.

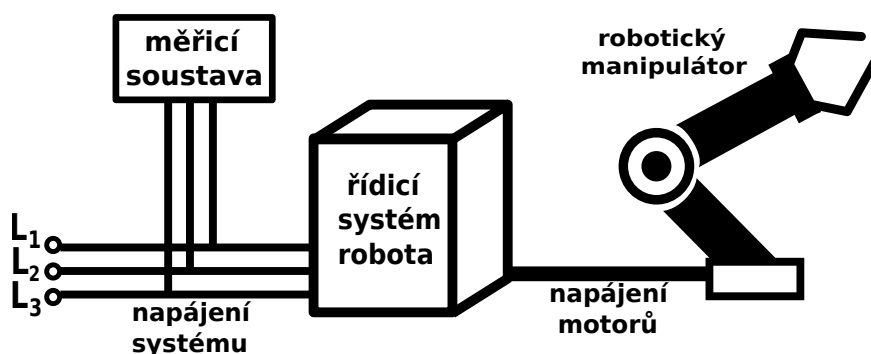
Celý systém je napájen z trojfázové sítě elektrické energie. Je určen pro montáž na zem nebo strop ve vnitřních prostorách. Podrobnější informace je možné nalézt v katalogovém listu [7].

Kapitola 3

Měření elektrického výkonu

Pro ověření přesnosti odvozeného modelu spotřeby robotu je potřeba provést srovnání jeho predikovaných hodnot s reálným měřením. Měření je prováděno dvěma způsoby. První způsob je měření proudu protékajícího vinutím jednotlivých motorů pomocí nástroje TRACE řídicího systému robotu. Z tohoto měřeného proudu je poté vypočítán elektrický výkon jednotlivých motorů. Druhý způsob je měření skutečného spotřebovaného výkonu celého robotického systému.

Měření reálného spotřebovaného výkonu bylo provedeno podle schématu na obrázku 3.1. Měřicí sestava je připojena na svorky napájecího vedení mezi elektrickou zásuvkou a skříní s řídicím systémem a napájením robotu. 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 3.1: 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 (5.12) 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 [22] 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 3.2: 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 3.2. Technické parametry a podrobnější informace o použití karty je možné nalézt v jejím manuálu [22].

Průmyslové PLC Siemens S7-300 CPU 315-2PN/DP [20] 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 [5].

Programování a konfigurace PLC je prováděna pomocí nástroje TIA Portal společnosti SIEMENS. Podrobné informace k PLC S7-300 jsou k dispozici v jeho dokumentaci [20].

3.3 Aplikace DEPO

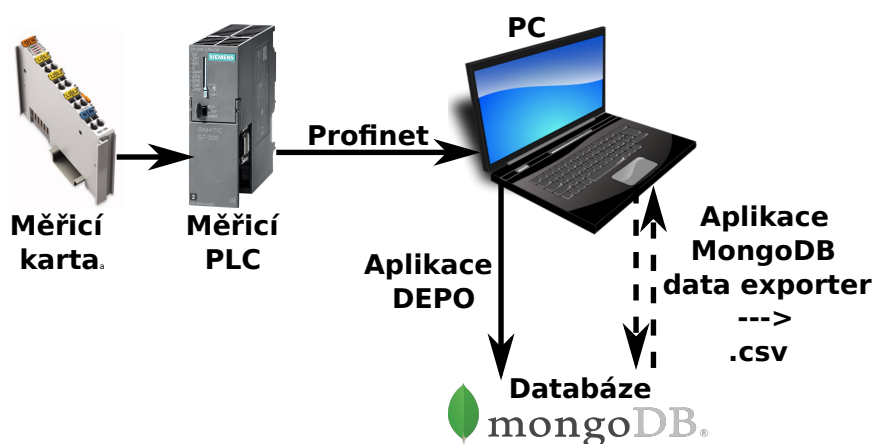
Za účelem ukládání změřených dat byla panem Ondřejem Fialou vytvořena aplikace DEPO. Aplikace je napsaná ve skriptovacím programovacím jazyce RUBY. Spouští se pomocí příkazového řádku na osobním počítači připojeném k Ethernetové síti, ke které je připojeno i měřicí PLC.

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 v interpretovaném skriptovacím jazyce RUBY, je možné ji spouštět na libovolném operačním systému, který podporuje spouštění RUBY skriptů.

Diagram zpracování dat měření výkonu je zobrazen na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Diagram zpracování dat měření výkonu.

Kapitola 4

Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby

Data o měření spotřeby elektrické energie robotu jsou pro pozdější analýzu nepřetržitě ukládána pomocí aplikace DEPO do databáze (sekce 3.3). Protože jsou data ukládána jako dlouhý řetězec znaků bez žádné pevné struktury a s proměnlivou délkou, byla pro tyto účely vybrána databáze MongoDB. Tato uložená data je možné následně analyzovat a použít pro optimalizační účely.

4.1 Databáze MongoDB

MongoDB je bezplatná (licence GNU AGPL v3.0) 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 podobném 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.

4.2 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 Calc a podobných. Pro tyto účely byla vytvořena aplikace MongoDB data exporter.

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.

Aplikace je napsaná v programovacím jazyce C. Pro přístup a komunikaci s databází MongoDB využívá volně dostupnou knihovnu MongoDB C Driver [10]. Protože aplikace nevyužívá žádné platformě závislé knihovny a příkazy, je možné ji zkompilovat a používat na UNIX-ových platformách i na platformě MS Windows. Aplikace nevyžaduje instalaci.

MongoDB data exporter se spouští pomocí terminálu nebo příkazového řádku. Pro jeho ovládání je použito textové uživatelské rozhraní. Za 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 4.1.

```
//===== MongoDB data exporter =====//  
//  
// Current date and time:          16.4.2017   13:34:17  
//  
// Connected to Mongo database:                depo  
// Chosen collection to export:      kvasiny_pricka_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_pricka_stena"  
// from database: "depo"  
// into file: "C:/mongodb_program/data_export.csv"  
//  
// Do you want to make a backup of "kvasiny_pricka_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.
```

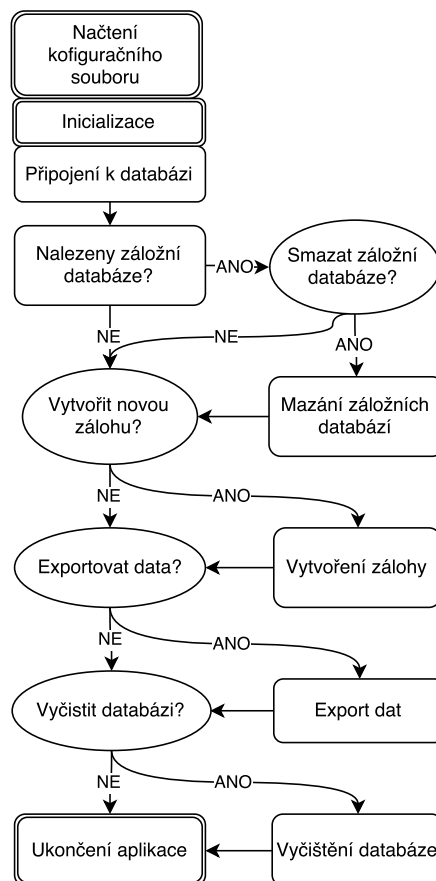
Obrázek 4.1: Ukázka prostředí aplikace MongoDB data exporter.

Protože jsou data, pro která je aplikace určena, zpravidla získávaná dlouhodobým měřením spotřeby (v horizontu dní až měsíců), může se jejich velikost pohybovat v rámci jednotek až desítek gigabajtů. Zpracování takového množství dat může trvat dlouhou dobu.

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 vláknu spuštěné aplikace je přidělen svůj úsek dat, který 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 dat o měření, ze kterého chce data exportovat. Čas a datum od kterého a do kdy chce uživatel data exportovat se zadává s přesností na minuty.

Vývojový diagram běhu aplikace MongoDB data exporter je zobrazen na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Diagram aplikace MongoDB data exporter.

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.

Aby bylo možné aplikaci používat v prostředí MS Windows je nezbytné k aplikaci přiložit dynamicky linkované knihovny (DLL) potřebné pro funkci POSIXových vláken (licence GNU LGPL v2.1) a knihoven pro práci s databází MongoDB (licence Apache License v2.0). Tyto knihovny jsou distribuovány společně s programem.

Kapitola 5

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 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 se tak o systém se šesti stupni volnosti. K popisu jeho dynamiky je proto potřeba celkem 6 diferenciálních rovnic druhého řádu. Celkově se tedy jedná o dynamický systém 12. řádu.

5.1 Pohybové rovnice

K odvození pohybových rovnic je možné použít jeden ze dvou základních přístupů a to Newton-Eulerovu metodu nebo Euler-Lagrangeovu metodu [8].

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 jsou pohyb a dynamika systému popisovány pomocí úhlů a jejich derivací na jednotlivých

osách, vyskytují se v jejich rovnicích nelineární goniometrické členy. Výsledné rovnice systému jsou proto silně nelineární. Pro zlepšení přehlednosti rovnic systému je možné tyto rovnice zapsat v následujícím maticovém tvaru jako

$$\mathbf{T} = \mathbb{M}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbb{C}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbb{G}(\boldsymbol{\theta}), \quad (5.1)$$

kde

$\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_n]^T$ je vektor momentů sil působících na jednotlivé osy robotu,

$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ je vektor úhlů na jednotlivých osách,

$\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_n]^T$ je vektor úhlových rychlostí na jednotlivých osách,

$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = [\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2, \dots, \ddot{\theta}_n]^T$ je vektor úhlových zrychlení na jednotlivých osách,

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

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

$\mathbb{G}(\boldsymbol{\theta})$ je matice gravitačních sil působících na jednotlivé osy,

n je počet os.

K výpočtu okamžité spotřeby elektrické energie je nutné řešit inverzní dynamickou úlohu (viz rovnice (5.1)), kdy se z okamžitých poloh, úhlových rychlostí a úhlových zrychlení na jednotlivých osách robota vypočítají točivé momenty, kterými na osy působí motory.

Moment síly motoru je závislý na proudu protékajícím jeho vinutím. Tuto závislost je obvykle možné aproximovat lineární závislostí [4] a psát jako

$$T(t) = KI(t), \quad (5.2)$$

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 výrobcem a je možné je dohledat v jejich dokumentaci [17][18][19].

5.2 Tření

Odvozené rovnice dynamiky robota popsané výše v sekci 5.1 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 je výhodné použít zjednodušený model popisující tření jako kombinaci viskózního a Coulombova tření [6], který značně zjednodušuje popis systému.

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

$$T_f = f_v \dot{\theta} + f_c \text{sign}(\dot{\theta}), \quad (5.3)$$

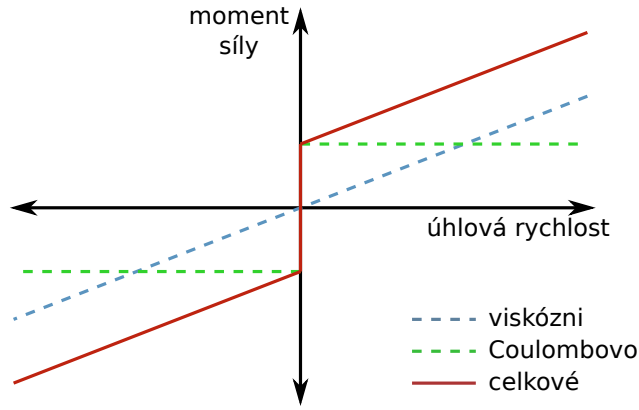
kde

T_f je moment síly generovaný třením,

f_v je koeficient viskózního tření,

f_c je koeficient Coulombova tření.

Na následujícím obrázku (obr. 5.1) 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 5.1: Model tření na osách robotu

Doplněním rovnic tření (5.3) do dynamických rovnic robotu (5.1) jsou odvozeny celkové rovnice dynamiky robotu ve tvaru

$$\mathbf{T}_r = \mathbb{M}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbb{C}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbb{G}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{F}_v\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{F}_c\text{sign}(\dot{\boldsymbol{\theta}}), \quad (5.4)$$

kde

$\mathbf{T}_r = [T_{r1}, T_{r2}, \dots, T_{rn}]^T$ je vektor celkových momentů sil působících na jednotlivé osy robotu,

$\mathbf{F}_v = [F_{v1}, F_{v2}, \dots, F_{vn}]^T$ je vektor koeficientů viskózního tření v jednotlivých osách,

$\mathbf{F}_c = [F_{c1}, F_{c2}, \dots, F_{cn}]^T$ je vektor koeficientů Coulombova tření v jednotlivých osách.

5.3 Elektrický výkon a spotřeba elektrické energie

Výkon je obecně definován jako práce W vykonaná za jednotku času [12]. Pro okamžitý výkon platí rovnice

$$p(t) = \frac{dW}{dt}. \quad (5.5)$$

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

$$p(t) = \frac{u(t)dq}{dt}. \quad (5.6)$$

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

$$p(t) = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t)i(t). \quad (5.7)$$

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

$$W = Pt. \quad (5.8)$$

Pro její okamžitou hodnotu lze tento vzorec upravit následovně

$$\frac{dW}{dt} = p(t). \quad (5.9)$$

Při zanedbání energetických ztrát v mechanické a elektrické části robotického systému a zanedbání vlivu napájení jeho elektronických součástí je možné očekávat rovnost mechanického výkonu s elektrickým výkonem.

5.3.1 Elektrický výkon v třífázové soustavě

Celý robotický systém je napájen z třífázové sítě. 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 fázím fázově posunut o 120 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

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos(\omega t + \phi), \\ i(t) &= I_m \cos(\omega t + \phi + \psi), \end{aligned} \quad (5.10)$$

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 střední hodnotu činné složky výkonu platí následující vztah

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt = UI\cos(\phi), \quad (5.11)$$

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

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

Pro potřeby modelování spotřeby elektrické energie 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

$$p(t) = p_U(t) + p_V(t) + p_W(t), \quad (5.12)$$

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

5.3.2 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.

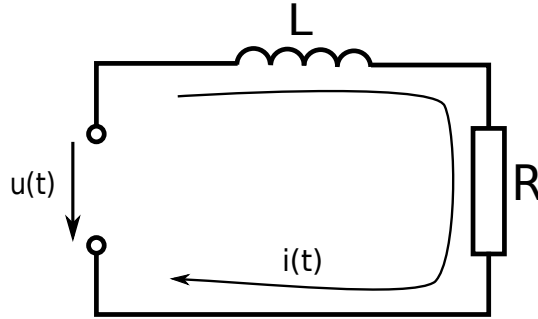
Je možné předpokládat, že spotřebovaný výkon jednotlivých senzorů a hlavní řídicí jednotky bude přibližně konstantní, protože musí pracovat stejně ze všech podmínek. Tato složka výkonu P_s bude přispívat k celkovému výkonu robotického systému, nebude ale závislá na jeho dynamice. Celkový výkon robotu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

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

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) + P_s, \quad (5.13)$$

kde n je počet motorů.

Osy robotu jsou poháněny elektrickými synchronními servomotory s permanentními magnety. K výpočtu výkonu elektrických motorů je potřeba vytvořit model jejich vinutí. 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 [[4]] tvořené odporem a indukčností v sérii. Elektrické schéma stejnosměrného motoru na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Elektrické schéma vinutí synchronního motoru.

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

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

$$u(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (5.14)$$

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

$$p(t) = i(t)u(t) = i(t) \left(i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \right). \quad (5.15)$$

5.4 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) [13]. Tento nástroj byl vyvinut na Indickém technologickém institutu v Dillí a je bezplatně k dispozici ke stažení a použití v MATLABu. K dispozici je bez zdrojových kódů. 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 funkce pro MATLAB s vygenerovanými pohybovými rovnicemi zadaného robotu.

5.5 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 5.1 je DH parametrizace robotu KUKA KR5 Arc použita v nástroji ReDySim pro vygenerování jeho dynamických rovnic.

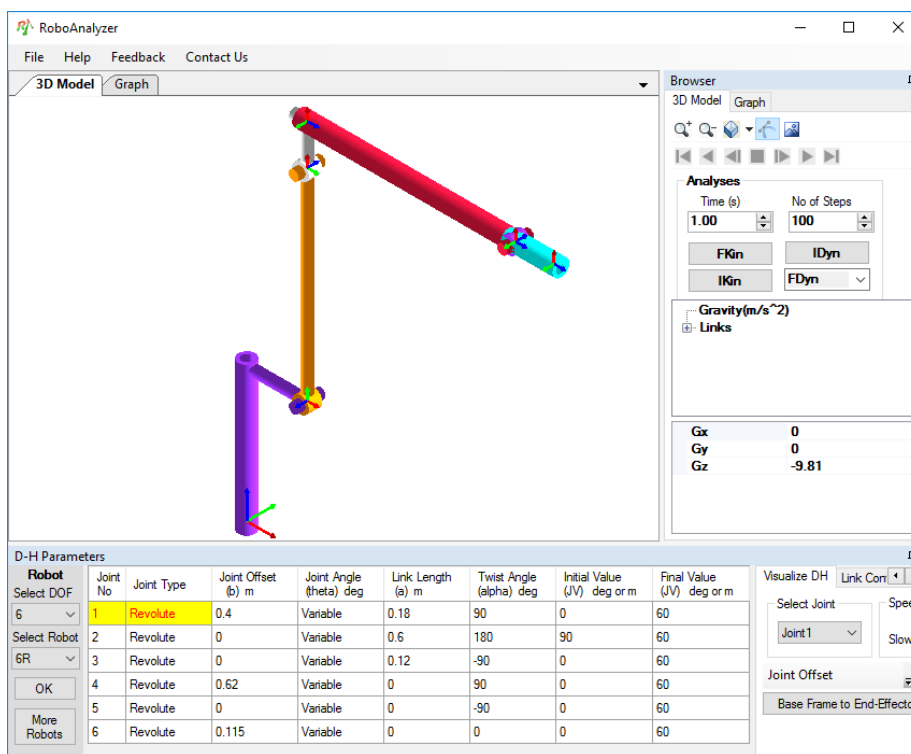
Osa	$a_i[m]$	$b_i[m]$	$\alpha_i[^\circ]$
1	0.18	0.4	90
2	0.6	0	180
3	0.12	0	-90
4	0	0.62	-90
5	0	0	90
6	0	0.115	0

Tabulka 5.1: 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 [14]. Tento nástroj byl vyvinut stejným týmem, jako solver ReDySim, na

univerzitě v Dillí pro účely vizualizace a simulace. RoboAnalyzer umožňuje simulovat dopředné a zpětné kinematické a dynamické úlohy. Dále umožňuje simulovat jednoduché pohyby robotu 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 5.3.



Obrázek 5.3: Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.

Kapitola 6

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.

6.1 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.

6.1.1 Přímé 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.

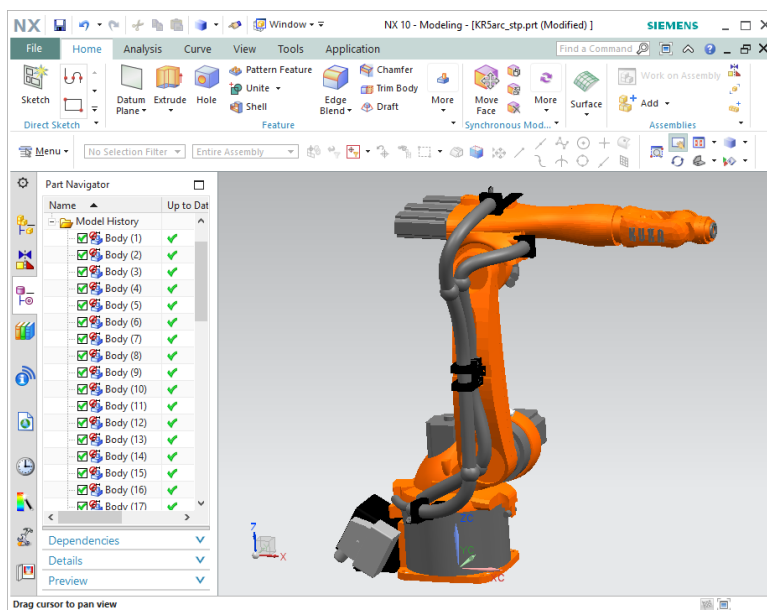
Určení parametrů takovýmto způsobem je ale možné pouze u jednoduchých laboratorních modelů robota tvořených malým počtem součástí. U větších a složitějších robotů, jako jsou průmyslové manipulátory, je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivá ramena sestávají z více komponent, jako 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 to, že tento způsob není možné zobecnit na více typů robotů. Každý nový typ robotu by bylo nutné rozebrat a změřit, i kdyby se jednalo o robota podobného typu a konstrukce. Proto se tato práce tímto postupem dále nezabývá.

6.1.2 Použití 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 6.1.



Obrázek 6.1: 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 dokumentaci. 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 6.1.3.

6.1.3 Analytické rovnice

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

Přestože jsou dynamické rovnice robotu (5.4) nelineární vůči jednotlivým zobecněným souřadnicím (polohy, úhlové rychlosti a úhlová zrychlení na jednotlivých osách), jsou lineární vůči jednotlivým složkám dynamických parametrů [23][11]. Proto je tyto rovnice možné přepsat do tvaru

$$\mathbf{T}_r = \mathbb{H}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{R}, \quad (6.1)$$

kde

$\mathbf{T}_r = [T_{r1}, T_{r2}, \dots, T_{rn}]^T$ je vektor momentů sil na osách v čase t ,

$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n]^T$ je vektor neznámých dyn. parametrů jednotlivých os,

n je počet os

a $\mathbf{R}_i = [I_{ixx}, I_{ixy}, I_{iyy}, I_{iyz}, I_{izz}, I_{izx}, m_i, m_i d_{ix}, m_i d_{iy}, m_i d_{iz}, f_{vi}, f_{ci}]$,

kde

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

r_{ij} je složka vektoru těžiště linku i vyjádřená v kartézské 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 robotu odpovídá počtu složek vektoru \mathbf{R}_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. Zároveň je možné model dále zjednodušit uvažováním pouze prvků na hlavní diagonále tenzorů setrvačnosti a zanedbáním prvků mimo ni. Touto aproximací je snížena přesnost modelu, ale zároveň se tím významně zjednoduší model. Dále jsou některé dynamické parametry robota jsou sdruženy. Příkladem může být moment setrvačnosti a poloha těžiště osy 1 nebo polohy těžišť os 3 a 4.

Díky tomu klesne počet neznámých parametrů v případě šestiosového robota z čísla 72 na číslo 48. V tabulce 6.1 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 6.1: Tabulka neznámých parametrů robota KUKA KR5 Arc.

Hledané parametry je poté možné vypočítat z rovnice (6.1) jejich vyjádřením ve tvaru

$$\mathbf{R} = \mathbb{H}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})^{-1} \mathbf{T}. \quad (6.2)$$

K výpočtu vektoru \mathbf{R} neznámých parametrů je potřeba s robotem vykonat pohyb po identifikační trajektorii a měřit polohy, úhlové rychlosti, úhlová zrychlení a momenty sil na jednotlivých osách. Do matice $\mathbb{H}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})$ jsou poté dosazeny tyto změřené polohy, úhlové rychlosti a úhlová zrychlení jednotlivých os v čase t a do vektoru \mathbf{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 (6.2). Důležité je na trajektorii mít změřen takový počet bodů, aby z této rovnice vznikla rovnice přeúčtená. Takovou přeúčtenou rovnici je poté možné řešit například použitím metody nejmenších čtverců, která minimalizuje střední odchylku mezi skutečnými a odhadnutými parametry a navíc je schopna potlačit vliv šumu měření.

6.1.4 Excitační trajektorie

Neznámé parametry identifikované postupem popsáním v sekci 6.1 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 jsou vybuzeny 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 v jejím okolí.

Ve vědeckých člancích a publikacích např. [11][15][23] 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 lineární kombinací harmonických průběhů. Tím je maximalizován vliv hledaných dynamických parametrů a minimalizován vliv šumu měření.

Protože se průmyslové manipulátory používají převážně pro polohování, je obtížné vykonávat na osách 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 přechod mezi těmito zadanými polohami aproximuje hladkou trajektorií.

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

6.2 Postup identifikace

Identifikaci parametrů robota KUKA KR5 Arc byla provedena způsobem popsáním výše v sekci 6.1.3.

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 poté byla převedena do maticového tvaru lineárního vůči neznámým dynamickým parametrům (rovnice (6.1)).

Za vektor \mathbf{R} neznámých parametrů byl zvolen vektor s parametry všech šesti os

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_{md}, \mathbf{R}_f]^T,$$

kde

$$\mathbf{R}_i = [I_{1x}, I_{1y}, I_{1z}, \dots, I_{6x}, I_{6y}, I_{6z}] ,$$

$$\mathbf{R}_{md} = [m_1, m_1 d_{1x}, m_1 d_{1y}, m_1 d_{1z}, \dots, m_6, m_6 d_{6x}, m_6 d_{6y}, m_6 d_{6z}] ,$$

$$\mathbf{R}_f = [f_{v1}, f_{c1}, \dots, f_{v6}, f_{c6}] .$$

Do matic $\mathbb{H}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta})$ a \mathbf{T} byly dosazeny jednotlivé polohy os, úhlové rychlosti, úhlová zrychlení a momenty sil naměřené v různých časech na identifikační trajektorii. Vektor neznámých parametrů \mathbf{R} byl poté vypočítán z rovnice (6.2) metodou nejmenších čtverců podle vztahu

$$\begin{aligned} \arg \min_{\mathbf{R}} \frac{1}{2} \|\mathbb{H}\mathbf{R} - \mathbf{T}\|_2^2, \\ \mathbf{lb} < \mathbf{R} < \mathbf{ub}, \end{aligned} \quad (6.3)$$

kde \mathbf{lb} je vektor dolních hranic hledaných hodnot a \mathbf{ub} je vektor jejich horních hranic.

Protože jsou dynamické rovnice robota silně nelineární, může se stát, že solver metody nejmenších čtverců nenalezne globálně optimální řešení, ale skončí v některém z lokálních minim. Je také možné, že solver 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 má být hledáno řešení. První z omezujících podmínek bylo, že všechny hmotnosti a momenty setrvačnosti mají mít kladné hodnoty. Dále bylo nastaveno omezení na hledané polohy těžišť 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.

6.2.1 Identifikační trajektorie

Protože je prostor kolem robota 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. Na celkovou dynamiku robotu mají výraznější vliv osy 1-3 než osy 4-6. Proto je výhodné tyto osy identifikovat separátně.

V první části trajektorie byl proveden pohyb pouze s posledními třemi osami (osa 6, osa 5 a osa 4). Ostatní osy byly v pevně zafixované pozici. Nejprve byl vykonán opakovaný pohyb pouze poslední šestou osou v jejím maximálním možném rozsahu v obou směrech otáčení. K tomu byl následně přidán obdobný pohyb páté osy a nakonec byl stejným způsobem přidán i pohyb čtvrté osy. Tímto byla pokryta 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.

V tomto případě byl postup takový, že nejprve byl vykonán opakovaný pohyb osy 3 v jejím plném rozsahu a byly zafixovány os 1 a 2. Následně byla zafixována osa 3 a stejným způsobem bylo pohybováno osou 2. Tímto byly pokryty pohyby nezávislé na rotaci kolem osy 1.

Trajektorie závislá na pohybu osy 1 byla vytvořena tak, že nejprve byl několikrát proveden pohyb osou 1 s rameny os 2 a 3 pevně zafixovanými ve vertikální poloze. Poté byly stejné pohyby provedeny 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.

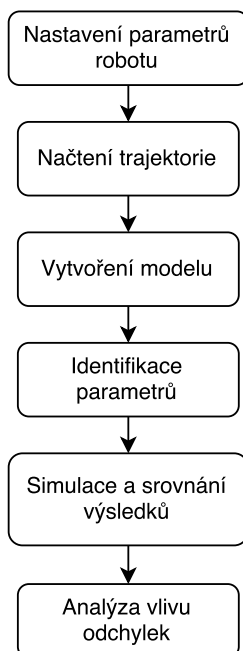
6.3 Identifikační skript pro MATLAB

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. Diagram znázorňující jednotlivé podprogramy ve skriptu je na obrázku 6.2.

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

zadáávají parametry motorů, mezi něž patří momentové konstanty a odpory a indukčnosti vinutí.



Obrázek 6.2: Diagram funkce identifikačního skriptu

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 robota, 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.

Nejprve je vytvořen vektor \mathbf{R} parametrů v symbolickém tvaru. Následuje načtení vygenerovaných rovnic z nástroje ReDySim, jejich převod do symbolického tvaru a uložení do matice rovnic. Z té je poté vygenerovaná matice $\mathbb{H}_i(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)$ se symbolickými proměnnými, do kterých je možné dosazovat změřená data.

Postupným dosazováním naměřených bodů na trajektorii (polohy, úhlové rychlosti a úhlová zrychlení) do matice $\mathbb{H}_i(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)$ je vytvořena matice \mathbb{H} . Současně je vytvořen vektor \mathbf{T} s dosazenými změřenými momenty sil.

Tyto vektory a matice jsou poté předány solveru `lsqlin`, který vypočte vektor \mathbf{R} vyřešením rovnice (6.2) metodou nejmenších čtverců. Zároveň je zde možné nastavit horní i spodní hranice jednotlivých parametrů vektoru \mathbf{R} ve kterých má solver řešení hledat.

Model s odvozenými parametry je možné v další části hned odsimulovat a porovnat se skutečnými změřenými trajektoriemi.

V poslední části je provedena analýza vlivu odchylek v hodnotách parametrů na přesnost energetického modelu robotu. Analýza vlivu odchylek je provedena pomocí metody Monte Carlo. Model je v cyklu odsimulován 200 krát pokaždé s jinou náhodně vygenerovanou hodnotou přičtenou k parametru. Poté je vypočítána střední odchylka mezi simulací a měřením. Tento postup je v cyklu opakován pro všechny identifikované parametry.

Následuje vyhodnocení těchto výsledku a nalezení případů, kdy byla odchylka mezi modelem a změřenými hodnotami největší. Ve skriptu je možné upravovat počet simulací a rozsah odchylek parametrů.

Kapitola 7

Identifikované parametry

Postupem popsaným v sekci 6.2 byly identifikovány všechny neznámé parametry. Identifikované parametry jsou uvedeny v tabulce 7.1. V následující tabulce 7.2 jsou pro srovnání vypsané hodnoty identifikované z 3D modelu robotu (viz sekce 6.1.2). 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 7.1: Tabulka parametrů identifikovaných z rovnic

Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m
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 7.2: 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.

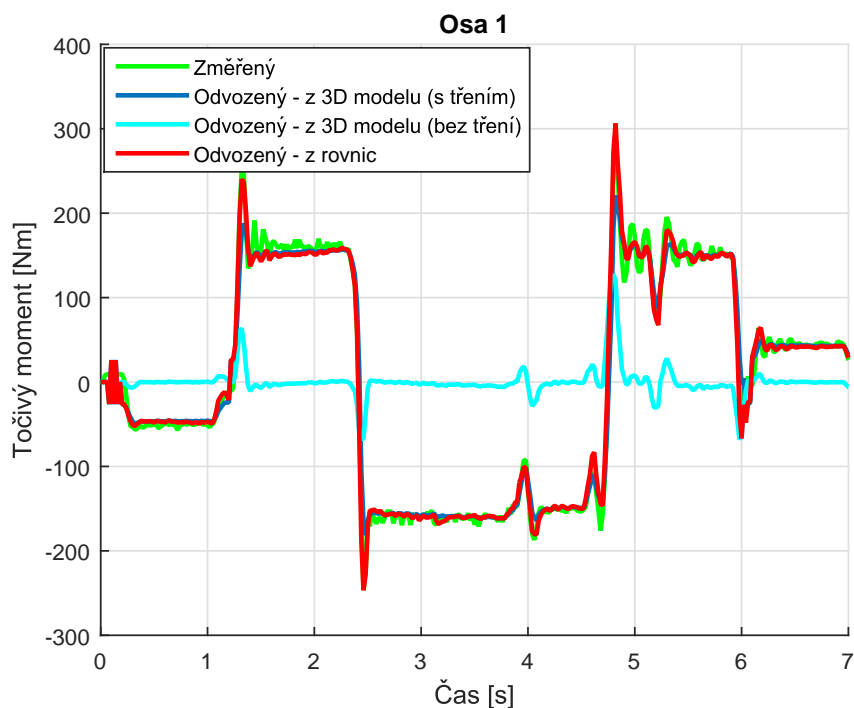
7.1 Simulace odvozených parametrů

Na následujících obrázcích (obr. 7.1a až 7.1f) jsou odsimulované průběhy točivých momentů s odvozenými parametry všech šesti os. Jsou v nich odsimulované predikované průběhy točivých momentů modelem s parametry odvozenými pomocí rovnic a pomocí 3D modelu.

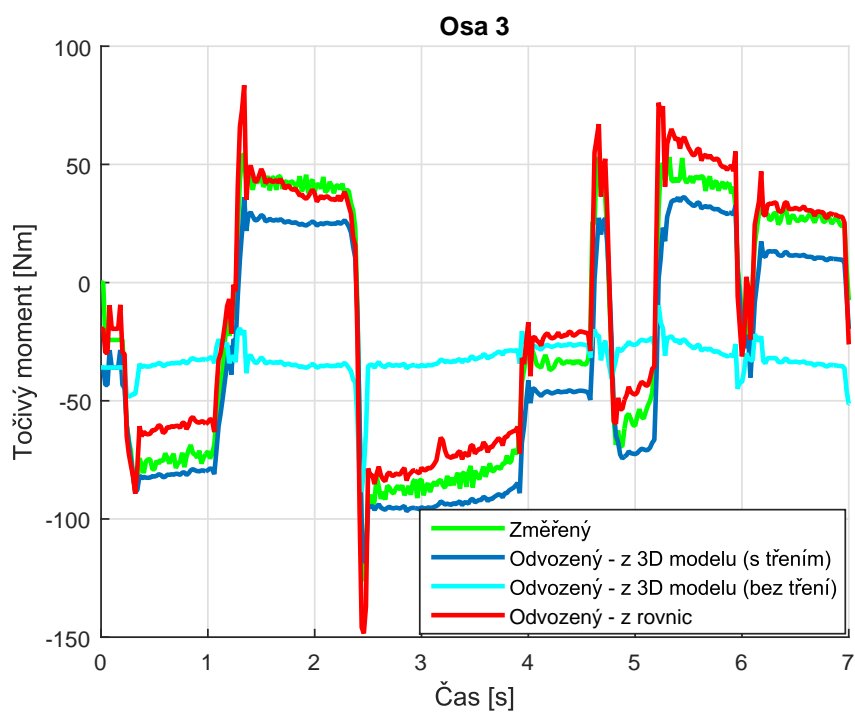
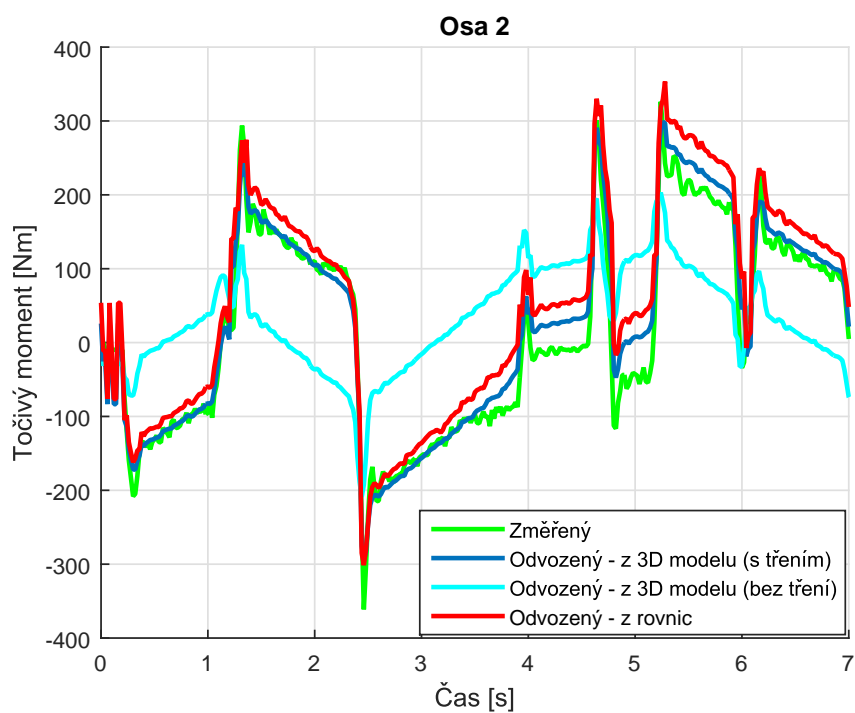
Simulace je provedena tak, že byl nejprve s robotem vykonán pohyb po určité trajektorii. Přitom byly měřeny průběhy poloh, úhlových rychlostí, úhlových zrychlení a momentů sil. Polohy, rychlosti a zrychlení byly následně dosazeny do odvozených identifikovaných modelů a výsledné momenty sil byly porovnány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

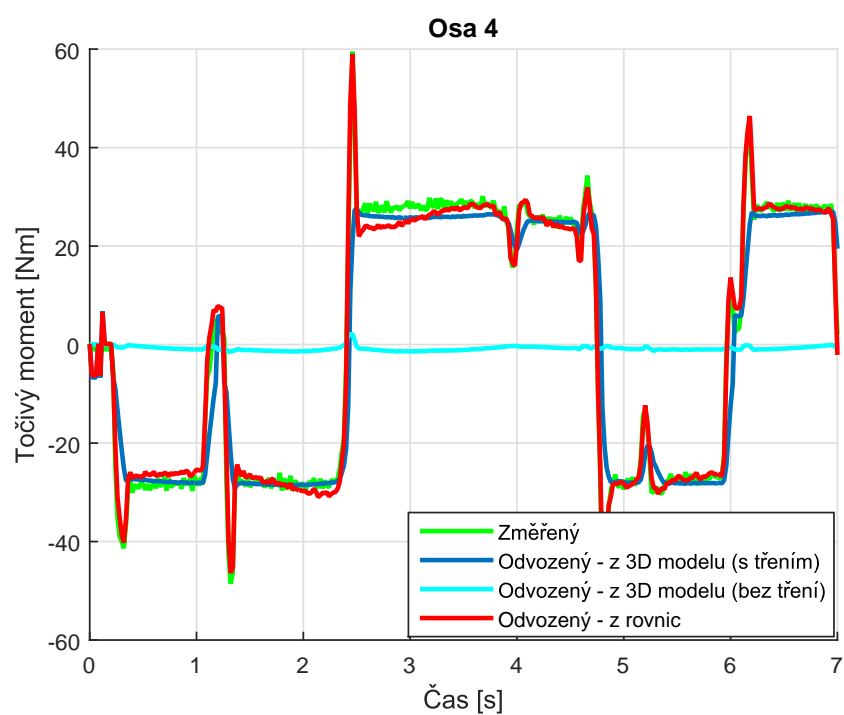
Protože z 3D modelu není možné získat koeficienty tření os, je zde možnost uvažovat tyto koeficienty jako nulové a tím je v modelu zanedbat. Tento model je ale velmi nepřesný (viz průběhy 7.1). Na průbězích je vidět, že vychází opravdu velmi vysoké odchylky od naměřených dat. Tření os hraje v dynamice 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.

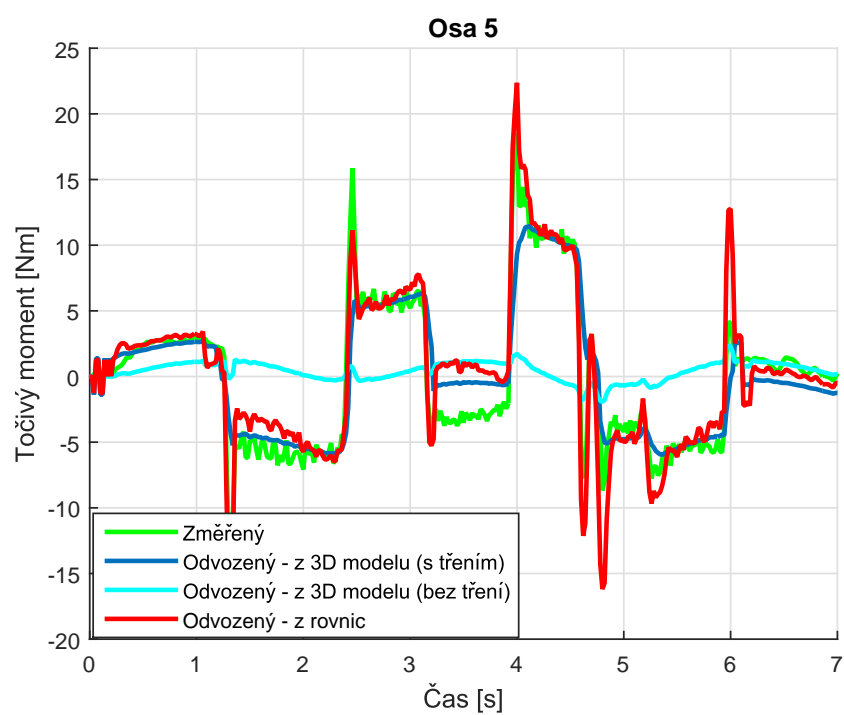


(a) : Osa 1

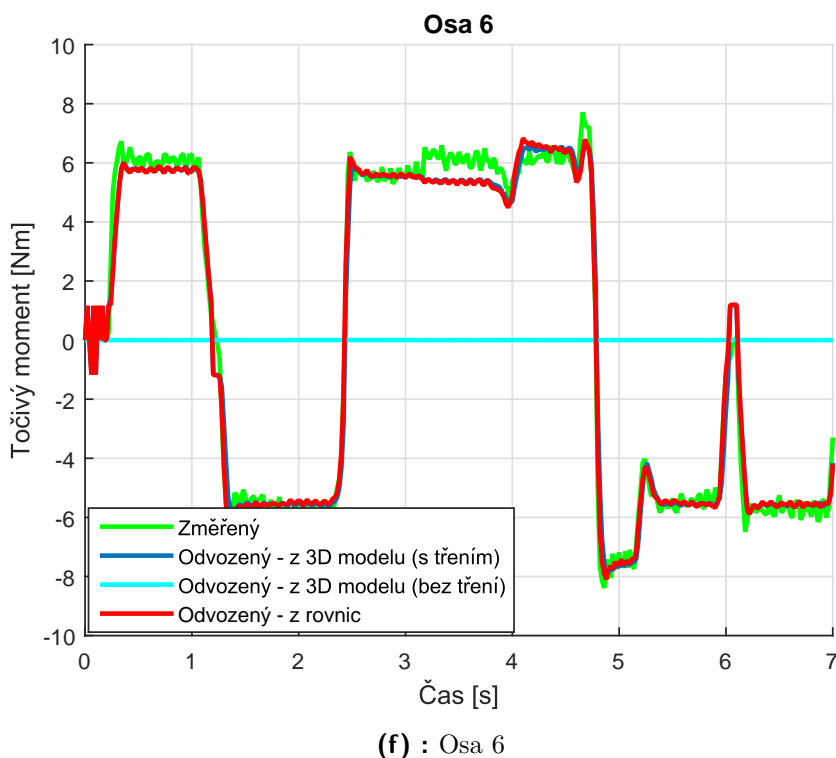




(d) : Osa 4



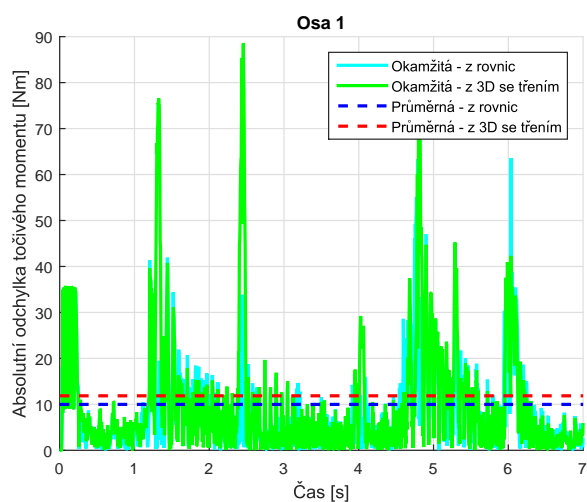
(e) : Osa 5



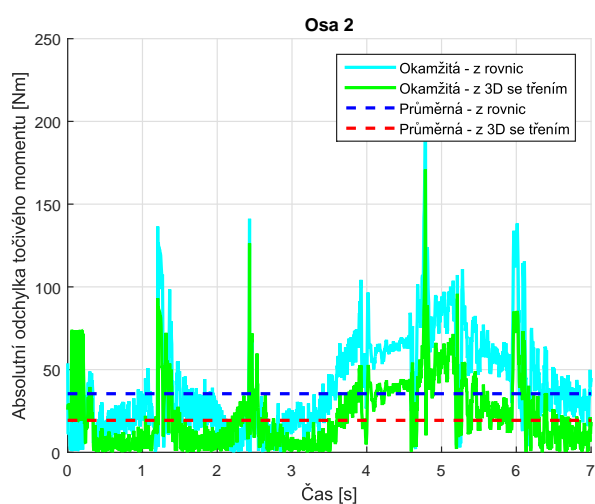
Obrázek 7.1: Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry

Z výše uvedených průběhů je patrné, že v případě zanedbání tření os je získaný model robotu 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.

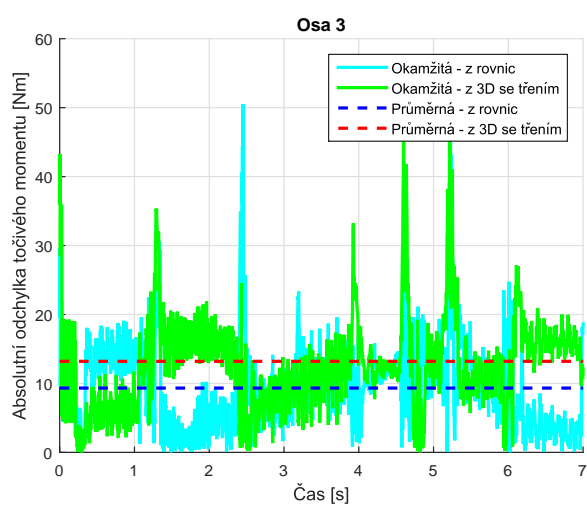
Naopak model s identifikovanými parametry pomocí analytických rovnic a pomocí 3D modelu se třením poskytuje poměrně přesné předpovědi. Ve většině případů jsou predikované hodnoty z modelu téměř totožné s těmi změřenými. Na následujících obrázcích (7.2a až 7.2f) je srovnání odchylek obou modelů. V grafech je znázorněna okamžitá a průměrná absolutní odchylka mezi modely a měřením.



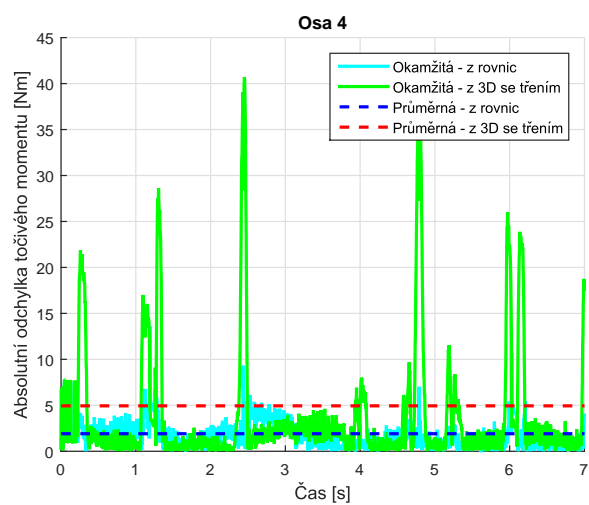
(a) : Osa 1



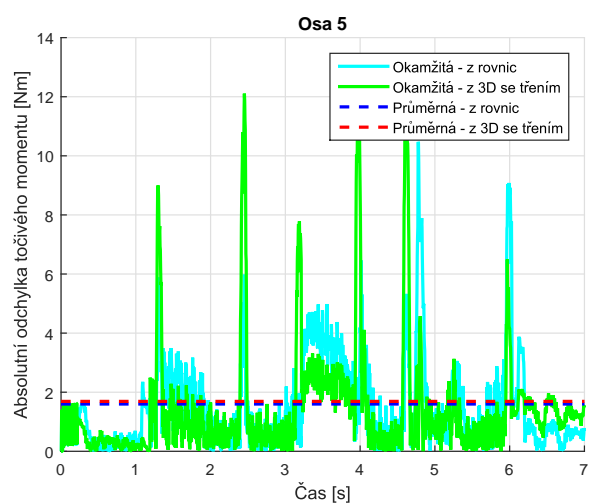
(b) : Osa 2



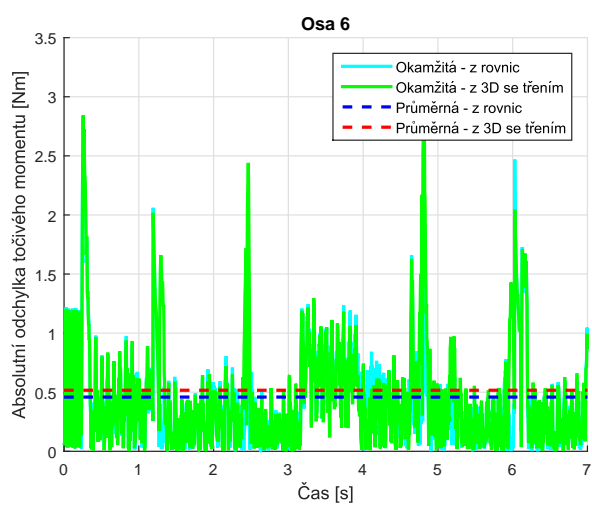
(c) : Osa 3



(d) : Osa 4



(e) : Osa 5



(f) : Osa 6

Obrázek 7.2: 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 vypořizovat, že model identifikovaný z rovnic dokáže lépe modelovat ostré špičky na momentech. Pro přesnější srovnání jsou v tabulce 7.3 uvedeny přesné hodnoty průměrných odchylek na jednotlivých osách.

Osa	Analytické rovnice		3D model [Nm]	
	Absolutní [Nm]	Relativní [%]	Absolutní [Nm]	Relativní [%]
1	9,99	8,10	11,86	9,57
2	43,77	30,30	24,20	15,52
3	9,33	17,48	13,20	24,73
4	1,91	7,01	4,94	18,13
5	1,60	25,84	1,69	28,33
6	0,46	8,07	0,52	9,12

Tabulka 7.3: Srovnání středních odchylek modelů vůči měření

Porovnáním odchylek těchto dvou metod identifikace v tabulce 7.3 je možné říct, že obě metody dávají srovnatelné modely. Podle předpokladů má metoda identifikace z rovnic nižší odchylky od změřených hodnot na většině os. 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 8

Srovnání výsledků

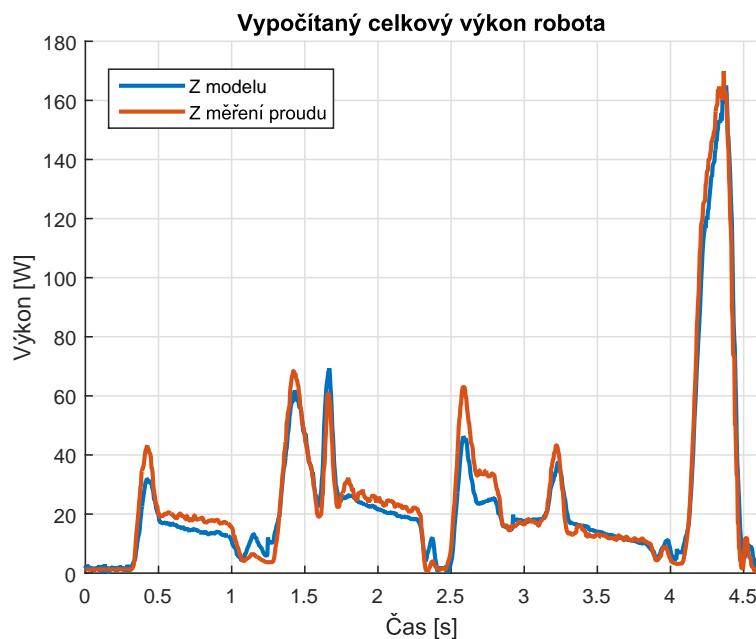
Odvozený model identifikovaný z rovnic v kapitole 7 dává do vztahu točivé momenty jednotlivých os s jejich polohami, úhlovými rychlostmi a úhlovými zrychleními (rovnice (5.4)). Tento model je dále možné použít k výpočtu celkového elektrického výkonu robota (viz sekce 5.3).

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 5.2) byly z těchto hodnot proudů vypočítány hodnoty efektivního napětí na svorkách motorů. Vynásobením hodnot napětí a proudů podle rovnice (5.15) byly vypočítány průběhy elektrických výkonů na jednotlivých osách. Celkový elektrický výkon robota je poté dán součtem všech dílčích výkonů na všech osách.

8.1 Dosažitelná přesnost modelu

Momenty sil na jednotlivých osách v jsou nástroji TRACE vypočítány ze změřených proudů, podle vzorce (5.2), jejich vynásobením příslušnými momentovými konstantami. Pokud by byly parametry modelu identifikovány naprosto přesně, byl by, s přihlédnutím k aproximacím a zjednodušením použitým při odvození modelu, 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 použitého modelu dosáhnout.

Na obrázku 8.1 je zobrazen průběh výkonu vypočítaného z modelu a z přímého měření proudů pomocí nástroje TRACE. Je patrné, že si oba průběhy poměrně odpovídají. Střední absolutní odchylka mezi oběma průběhy je 4,08 W, což odpovídá relativní střední odchylce 15,79%. Přesnost odvozeného modelu se tedy blíží maximální možné dosažitelné přesnosti použitého modelu a jeho identifikace z rovnic systému.



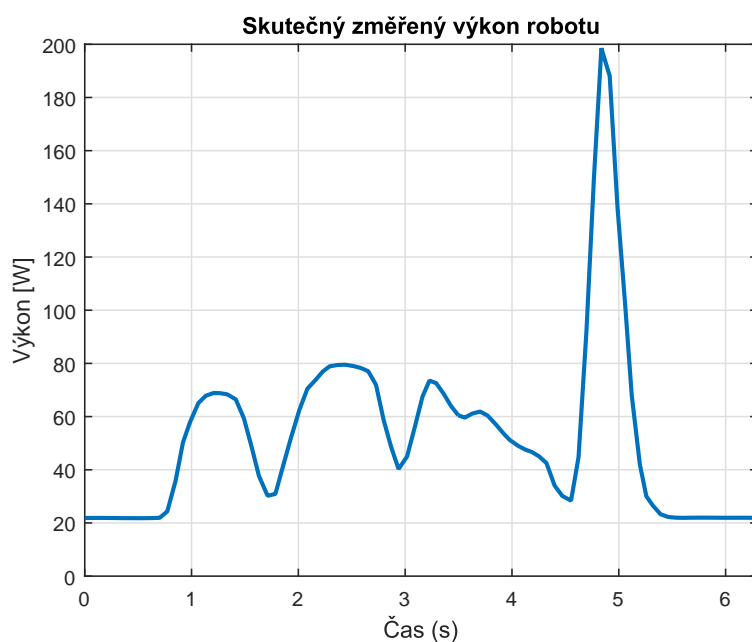
Obrázek 8.1: Srovnání vypočítaného výkonu z modelu a z měření proudu

8.2 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.

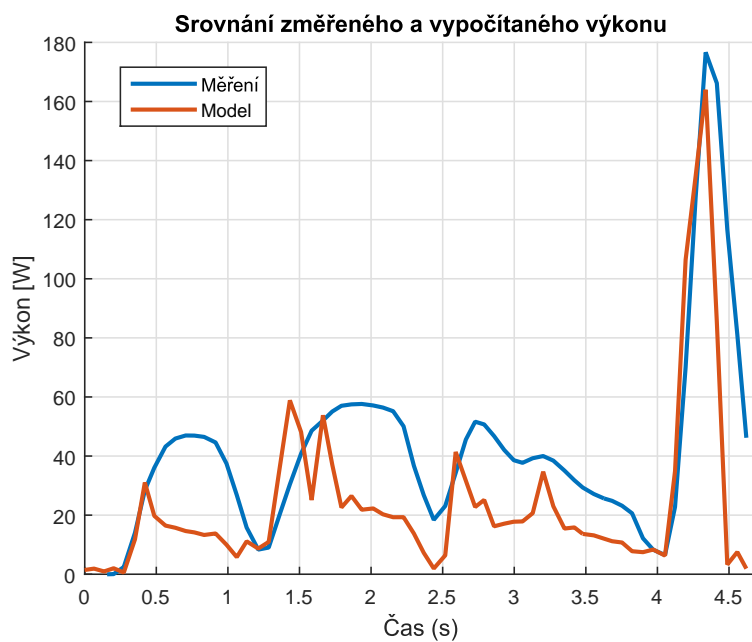
Při tomto pohybu robota byl v jeho řídicím systému spuštěn nástroj TRACE zaznamenávající průběh poloh, úhlových rychlostí a úhlových zrychlení potřebný pro model výkonu. Zároveň bylo spuštěno měřicí PLC ukládající skutečný naměřený činný výkon na napájecím vedení robota. Skutečný změřený výkon je na obrázku 8.2.

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 8.2: Skutečný změřený výkon robotu

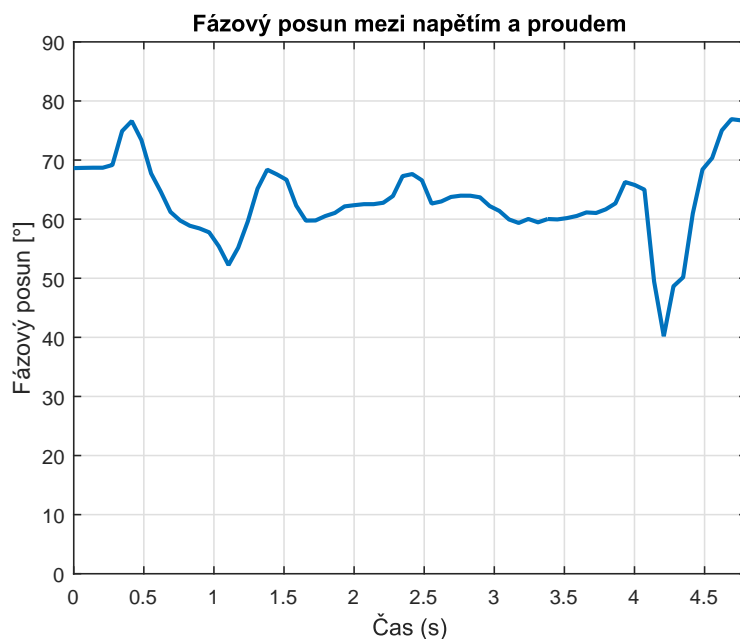
Dále je potřeba průběhy převzorkovat, protože měřicí karta má pro měření činného výkonu vzorkovací periodu 40 ms a nástroj TRACE robotu zaznamenává data s periodou 4 ms. Nakonec byla ještě od změřených dat odečtena stálá složka výkonu, která není závislá na dynamice pohybu robotu. Z obrázku je možné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



Obrázek 8.3: Srovnání měření a modelu výkonu

motorů při krátkých proudových impulsch. Dále bývá jejich řídicí logika navržena tak, aby eliminovala příliš vysoké proudové špičky za účelem snížení zátěže mechanických částí motoru.

Na obrázku 8.4 je průběh fázového posunu mezi napětím a proudem na napájecím vedení robotického systému při vykonávání určité trajektorie. Tento fázový posun byl vypočítán z měření činného a zdánlivého výkonu.

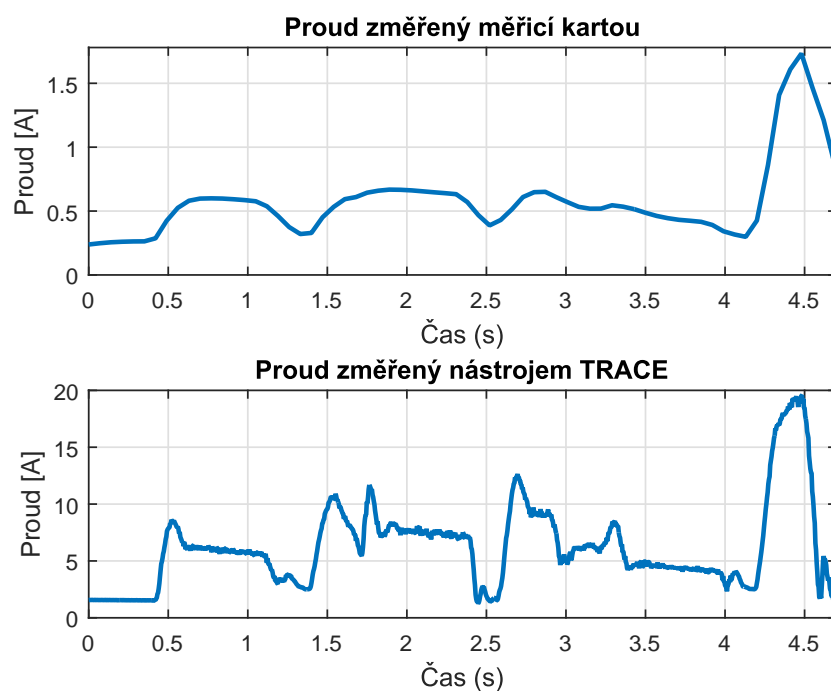


Obrázek 8.4: Fázový posun mezi napětím a proudem na napájecím vedení robotu

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 8.5 porovnání celkového efektivního 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 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 8.5: Srovnání celkových změřených proudů

Dále je možné předpokládat, že v rozvaděči celého robotického systému jsou kromě frekvenčních měničů také další elektronické prvky sloužící ke 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. Jednalo by se ale o intrusivní měření, kterému se tato práce snaží vyhnout.

Kapitola 9

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.

9.1 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 [9]. 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 R_i byla náhodně přičtena hodnota z rozsahu $p \in [-0.2R_i, 0.2R_i]$, se kterou byla provedena simulace a vypočítaná střední odchylka mezi simulací a změřenými průběhy. Pro každý parametr bylo takto provedeno 150 simulací, pokaždé s náhodně vygenerovanou hodnotou. Ostatní hodnoty parametrů zůstaly nezměněné. Rozsah přičítaných hodnot $p \in [-0.2R_i, 0.2R_i]$ byl zvolen v okolí nominální hodnoty parametru, aby se pohyboval pouze v okolí lokálního minima.

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

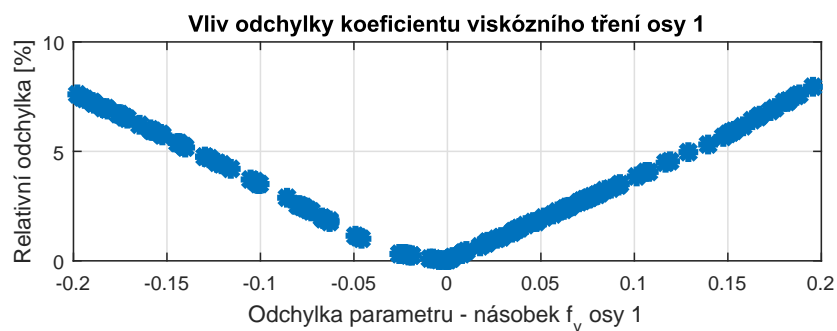
9.2 Vyhodnocení

Vyhodnocené maximální relativní odchylky mezi simulacemi a změřenými průběhy jsou uvedeny v tabulce 9.1. Hodnoty v tabulce jsou vztaženy ke střední odchylce mezi výkonem vypočítaným pomocí identifikovaného modelu a určeným pomocí měření proudů (viz sekce 8.1). Hodnoty udávají, o kolik se zvýší odchylka ve wattech mezi modelem a měřením vůči původnímu identifikovanému modelu.

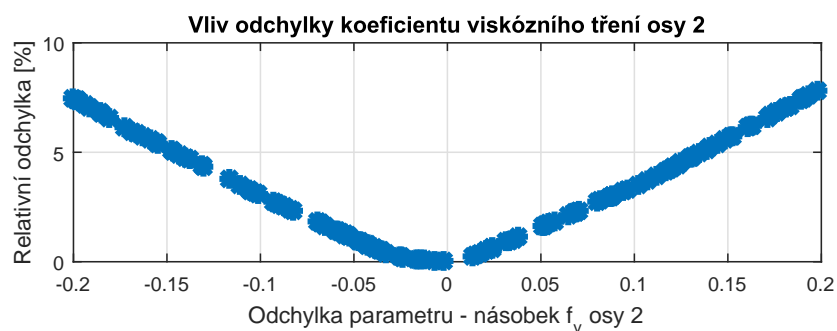
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1	0	0	0.349	0	0	0	0	7.080	0.271
2	0.018	0.022	0.145	0.392	0.461	0	0.050	6.941	0.585
3	0.001	0.068	0.100	0.722	0.695	0.147	5.202	0.247	0.021
4	0.033	0.106	0.011	0.267	0.044	0.044	6.269	0.160	0.005
5	0.003	0.004	0.046	0.381	0.002	0.024	0.876	0.004	0.001
6	0.007	0.046	0.001	0	0	0.045	0.246	0	0

Tabulka 9.1: Tabulka maximálních dosažených odchylek vzhledem k odchylkám v parametrech

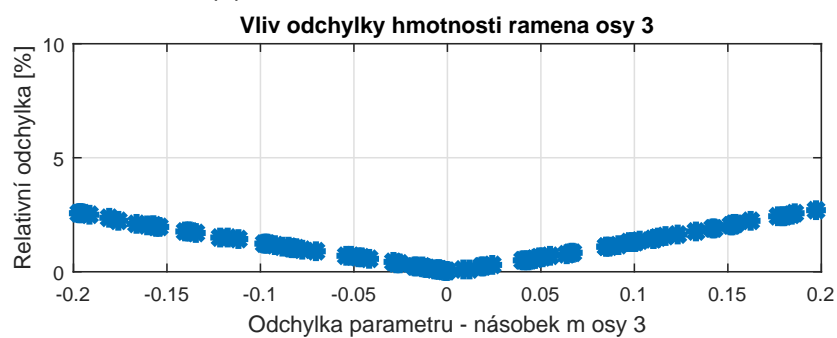
Z hodnot v tabulce je možné vyzorovat, že největší vliv na přesnost modelu mají koeficienty viskózního tření (f_v) osy 1 a 2 a hmotnosti ramen (m) os 3 a 4. Na obrázcích 9.1a až 9.1d jsou znázorněny vlivy jednotlivých odchylek těchto parametrů na celkovou odchylku modelu vůči měření. Na svislé ose je relativní odchylka, o kterou se zvýší střední odchylka modelu vůči měření v závislosti na změně parametru. Na vodorovné ose je pak odchylka v identifikovaném parametru.



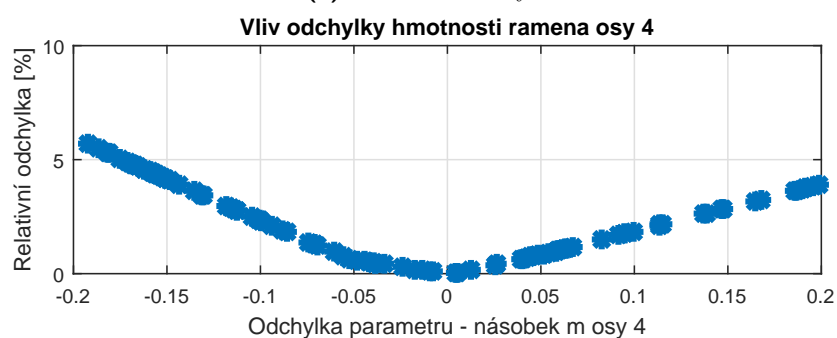
(a) : Koeficient viskózního tření osy 1



(b) : Koeficient viskózního tření osy 2



(c) : Hmotnost osy 3



(d) : Hmotnost osy 4

Obrázek 9.1: Vliv odchylek vybraných parametrů na přesnost modelu

Největší vliv na přesnost modelu mají tedy koeficienty tření, hmotnosti a polohy těžišť prvních tří os. Z tohoto důvodu je vhodné si při identifikaci těchto parametrů dát větší pozor a přizpůsobit identifikační excitační trajektorii tak, aby byly identifikovány s co největší přesností.

Kapitola 10

Závěr

V této práci byly prostudovány způsoby vytvoření modelu šestiosého průmyslového robotu a identifikace jeho dynamických parametrů. Důraz byl kladen na vytvoření metodiky identifikace, kterou by bylo možné použít na široké spektrum typů robotu.

Tento model by měl sloužit pro modelování spotřeby elektrické energie robotického systému. Z modelu je možné z pohybu při požadovaných robotických operacích predikovat, jaké množství energie tato operace spotřebuje a díky tomu daný proces optimalizovat.

Z hlediska standardizace identifikace dynamických parametrů byly prostudovány a vzájemně porovnány dva postupy, identifikace z 3D modelu robotu a z jeho rovnic. Byly popsány postupy obou způsobů identifikace a analyzovány jejich výhody a nevýhody. Dynamické parametry byly také analyzovány z hlediska jejich vlivu na přesnost dynamického modelu robotu. Díky tomu je možné určit, které dynamické parametry hrají v přesnosti modelu největší roli.

Pro identifikaci dynamických parametrů z rovnic robotu byl vytvořen skript pro MATLAB, který je schopen vytvořit matematický model, identifikovat jeho parametry, simulovat výsledky a porovnat je s měřením. Skript také umožňuje provádět analýzu vlivu odchylek odhadnutých parametrů na přesnost modelu.

Data získaná pomocí odvozeného modelu byla porovnána se skutečným reálným měřením. Dále byla provedena analýza důvodů odchylek mezi predikcí a měřením a navrženy způsoby, jak potlačit jejich vliv.

V poslední řadě byla vytvořena aplikace sloužící k exportu dat z databáze dlouhodobého měření energetické spotřeby robotické buňky. Aplikace je schopna provádět zálohu, čištění a export dat z databáze. Byla vytvořena pro zjednodušení a zefektivnění přípravy dat z databáze měření energetické spotřeby robotické buňky používané v závodu společnosti ŠKODA AUTO a.s. v Kvasínách.

Hlavním výsledkem práce ale je vytvoření standardizovaného postupu odvození energetického modelu a jeho identifikace. Tento postup je možné s minimálními úpravami aplikovat na téměř libovolný typ sériového průmyslového robotu. Odvozený a identifikovaný model je možné použít pro optimalizační účely, případně je jej možné upravit nebo doplnit pro jeho zpřesnění nebo predikci jiných hodnot.

■ 10.1 Práce do budoucna

Za účelem snížení odchylky mezi daty predikovanými pomocí vytvořeného matematického modelu a daty naměřenými způsobem popsaným v této práci je potřeba provést některé úpravy, započítávající vliv frekvenčních měničů a dalších elektrických součástí v rozvaděči robotického systému.

Jednou z možných úprav je doplnění do modelu robotu rovnic popisujících elektrickou část frekvenčních měničů řídících motory robotu, stabilizátorů napájení a dalších elektrických prvků v elektrickém systému robotu.

Druhou možností je úprava způsobu měření reálné spotřeby robotu tak, aby energie těchto elektrických zařízení nebyla v měření započítána.



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] Bruno Siciliano, Oussama Khatib. - Handbook of Robotics. *Springer*, 2008.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ivan Virgala, Peter Frankovský, Mária Kenderová. - Friction Effect Analysis of a DC Motor. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2013.
- [7] 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.
- [8] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. - Robot Modeling and Control - 1st EDITION. *John Wiley & sons, inc.*, 2005.
- [9] Masayuki Yano, James Douglass Penn, George Konidakis, Anthony T Patera. - Math, Numerics, & Programming (for Mechanical Engineers). *MIT OpenCourseWare*, 2013.

- [10] MongoDB C Driver. 2017. URL <http://mongoc.org/>.
- [11] Ngoc Dung Vuong, Marcelo H. Ang Jr. - Dynamic Model Identification for Industrial Robots. 2009.
- [12] prof. Ing. Ivan Zemánek, CSc. - Studijní materiály k předmětu A3B31EOP – Elektrické obvody a prvky. 2002.
- [13] Recursive Dynamics Simulator (ReDySim). 2017. URL <http://www.redysim.co.nr/>.
- [14] RoboAnalyzer. 2017. URL <http://www.roboanalyzer.com/>.
- [15] R. van der Aalst. - Dynamic identification of a Mitsubishi PA-10 robotic manipulator. 2008.
- [16] Seyed Mahdi Hashemi. - Parameter identification of a robot arm using separable least squares technique. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2009.
- [17] Siemens AG. - Dokumentace k motoru - SIMOTICS 1FK7032-5AK71-1UU3-Z. 2016. URL <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FK7032-5AK71-1UU3-Z>.
- [18] Siemens AG. - Dokumentace k motoru - SIMOTICS 1FK7042-5AK71-1UG2. 2016. URL <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FK7042-5AK71-1UG2>.
- [19] Siemens AG. - Dokumentace k motoru - SIMOTICS 1FK7060-5AF71-1TG3. 2016. URL <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FK7060-5AF71-1TG3>.
- [20] SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP - Datasheet. 2017. URL <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7315-2EH14-0AB0>.
- [21] U.S. Energy Information Administration (EIA). - Industrial sector energy consumption. 2016. URL <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/industrial.pdf>.
- [22] WAGO-I/O-SYSTEM 750 - Manuál. 2017. URL http://www.wago.com/wagoweb/documentation/750/eng_manu/modules/m07500494_0en.pdf.
- [23] 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.

Příloha A

Návod k aplikaci MongoDB data exporter

A.1 Kompilace

Aplikace MongoDB data exporter je napsána v jazyce C. Zdrojový kód aplikace je součástí této práce a je přiložen v souboru

Aplikace je vytvořena jako multiplatformní. Zdrojový kód obsahuje pouze knihovny, které je možné použít na libovolné platformě. Pro vytvoření spouštěče aplikace je nezbytné zdrojové soubory zkompileovat pro použití na dané požadované platformě.

Pro kompilaci pro systém Linux je možné použít vestavěnou sadu kompilátorů GNU Compiler Collection použitím příkazu `gcc`. Kompilaci pro MS Windows je možné provést například pomocí nástroje Visual Studio příkazem `cl.exe`. Dynamicky linkované knihovny DLL jsou přiloženy ke zdrojovému kódu.

A.2 Použití

Aplikace je používána k exportu dat z databáze MongoDB měření elektrického výkonu průmyslových manipulátorů v robotické lince.

Umožňuje uživateli správu záloh databáze (mazání starých záloh, vytvoření nových), export dat ze specifikované databáze a kolekce do určeného souboru a nakonec její čištění.

Aplikaci je možné použít jako vícevláknovou. Uživatel má možnost si zvolit počet vláken použitých pro převod a export dat za účelem zrychlení zpracování velkého množství dat. Každé vlákno poté zpracovává svůj vlastní úsek dat a ukládá jej do samostatného souboru který je označován jako `pn` (`n` ... počet vláken). Aplikace podporuje až 16 současně spuštěných vláken.

DATA_TO=1701041215 - čas do kterého mají být exportována data

Formát časových hranic: RRMMDdhmm RR-rok, MM-měsíc,
DD-den, hh-hodina, mm-minuta

Pokud nechcete použít časový úsek, zadejte hodnoty 0

Aplikace spuštěná s tímto konfiguračním souborem se připojí k databázi MongoDB běžící na místní adrese (localhost) na portu 27010. Dále se pokusí připojit k databázi `database` a ke kolekci `collection`. Data budou exportována od začátku až do 4.1.2017 - 12:15. Protože jsou vybrána dvě vlákna, budou vytvořeny 2 výstupní soubory. Data budou exportována do těchto dvou výstupních souborů:

```
data_export_0-1701041215_p1.csv  
data_export_0-1701041215_p2.csv  
umístěných v C:/
```