

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

Díky

Poděkování

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

text abstraktu cesky

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

Vedoucí práce: Ing. Martin Ron

Abstract

Text abstraktu anglicky

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

Title translation: Identification of a 6-axis industrial robot

Obsah

1 Úvod	1	5 Identifikované parametry	21
1.1 Motivace	1	5.1 Simulace odvozených parametrů	22
1.2	1	6 Měření elektrického výkonu	27
1.3 Očekávaný přínos	1	6.1 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750	28
2 Robotický systém	3	6.2 PLC Siemens S7-300	28
3 Dynamický model	5	6.3 Aplikace DEPO	29
3.1 Pohybové rovnice	5	7 Srovnání výsledků	31
3.2 Tření.....	6	8 Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby	33
3.3 Elektrický výkon	8	8.1 Databáze MongoDB.....	33
3.3.1 Elektrický výkon v třífázové soustavě	8	8.2 Aplikace MongoDB data exporter	33
3.3.2 Elektrický výkon synchronního motoru	9	9 Závěr	37
3.4 Solver ReDySim	10	9.1 Výsledky práce	37
3.5 Modifikované DH parametry robota.....	10	9.2 Práce do budoucna	37
4 Identifikace systému	13	Reference	39
4.1 Způsoby identifikace	13		
4.1.1 Z přímého měření součástí robota	13		
4.1.2 Z 3D modelu	14		
4.1.3 Z rovnic	15		
4.1.4 Excitační trajektorie	16		
4.2 Postup identifikace.....	17		
4.2.1 Identifikační trajektorie	18		
4.3 Skript pro MATLAB	19		
4.4 ***** Vliv odchylek *****	20		

Obrázky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [2].	3
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [2].	4
3.1 Model tření os	7
3.2 Elektrické schéma vinutí synchronního motoru.	9
3.3 Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.	11
4.1 3D model robota KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0.	14
5.1 Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry	25
5.2 Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry	26
6.1 Schéma zapojení soustavy pro měření výkonu.	27
6.2 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750.	28
8.1 Ukázka prostředí aplikace MongoDB data exporter.	34

Tabulky

3.1 Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.	11
4.1 Tabulka nezáměch parametrů robota KUKA KR5 Arc.	16
5.1 Tabulka identifikovaných parametrů z rovnic	21
5.2 Tabulka identifikovaných parametrů z 3D modelu	21



Kapitola 1

Úvod



1.1 Motivace



1.2



1.3 Očekávaný přínos

Kapitola 2

Robotický systém

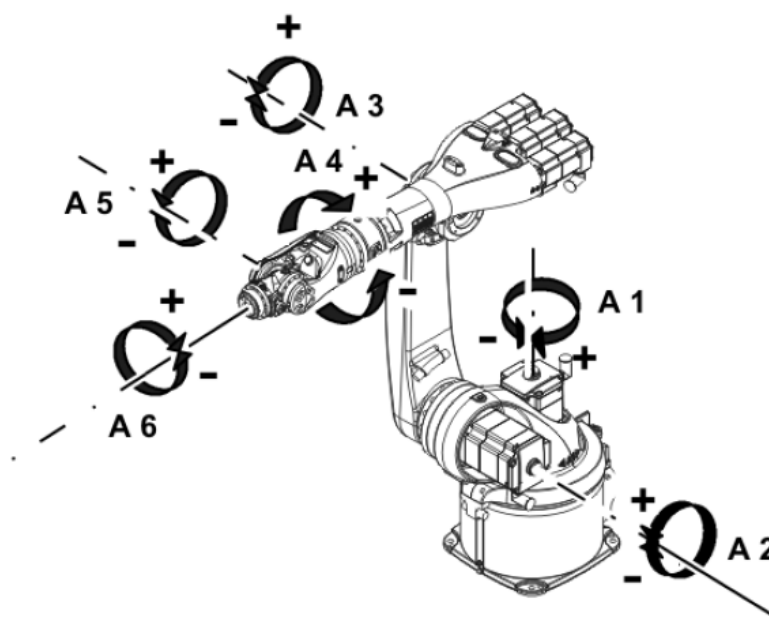
Identifikace byla provedena na průmyslovém robotu KUKA KR5 Arc [3] od společnosti KUKA Roboter GmbH (obr. 2.1). Jedná se o 6-ti osového robota, který má 6 rotačních os poháněných servomotory.

Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Díky tomu je robot schopen vykonávat široké spektrum operací, které je schopen vykonávat člověk. Konfigurace os robota je zobrazena na obrázku 2.2.



Obrázek 2.1: Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [2].

Tento robot s hmotností 127 kg a základní nosností 5 kg patří mezi lehčí průmyslové roboty. Byl vyvinut primárně pro aplikace vyžadující vysokou přesnost polohování, jako je obloukové svařování a přesná manipulace s lehkými pevnými předměty. 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 o je robot schopen dosahovat vysokých provozních rychlostí s rychlostí koncového efektoru přesahující 5 m/s.



Obrázek 2.2: Konfigurace os robota. Převzato z [2].

Jako pohony os jsou použity třífázové synchronní servopohony s permanentními magnety (PMSM). Pro zvýšení točivého momentu motorů a přesnosti polohování jsou motory opatřeny převodovkou. Servomotory robota jsou vybaveny snímači pro snímání úhlu natočení rotoru, sondami pro měření proudu protékajícího jejich vinutím a tepelnými senzory pro měření teploty uvnitř motoru. Jednotlivé osy jsou dále vybaveny brzdým mechanismem, který zabraňuje otáčení os, 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 mnoho 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. [2].

Kapitola 3

Dynamický model

Pro výpočet a predikci spotřeby elektrické energie je nezbytné vytvořit matematický dynamický model robota.

V případě 6-ti osového manipulátoru se jedná o systém se šesti stupni volnosti. K popisu jeho dynamiky je proto potřeba 6 rovnic druhého řádu. Celkově se tedy jedná o systém dvanáctého řádu.

3.1 Pohybové rovnice

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

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

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

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

Rovnice systému je možné zapsat v následujícím maticovém tvaru jako

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

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, kdy se z okamžitých poloh, rychlostí a zrychlení na jednotlivých osách robota vypočítají točivé momenty, kterými působí motory.

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

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

kde

$T(t)[Nm]$ je moment síly motoru

$K[Nm/A]$ je momentová konstanta

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

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

3.2 Tření

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

Kompletní popis tření os je relativně komplikovaný. Proto se zpravidla pro jeho modelování používá zjednodušený model popisující tření jako kombinaci viskózního a Coulombova tření [1].

Viskózní tření je tření, které je lineárně závislé na rychlosti rotace. Při nulové rychlosti je třecí moment síly nulový a s rostoucí rychlostí se zvyšuje.

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

Tento model je popsán rovnicí

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

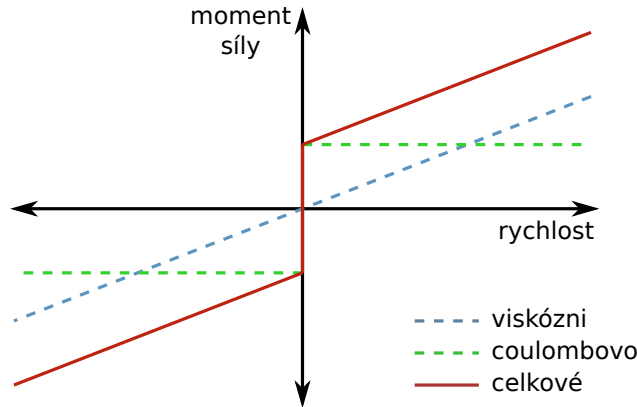
kde

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 model tření včetně jeho jednotlivých složek. Na vodorovné ose je uvedena rychlost otáčení, na vertikální ose je třecí moment síly.



Obrázek 3.1: Model tření os

Doplněním rovnice 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

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

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = UI \cos \phi \quad (3.9)$$

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

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

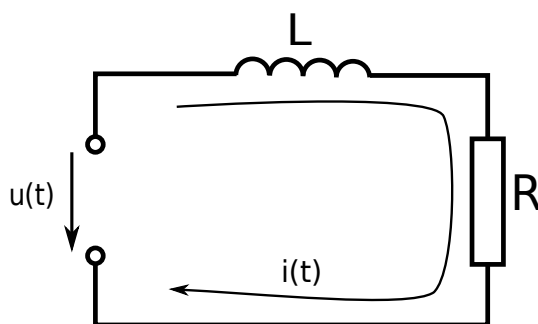
V případě třífázové soustavy je její celkový výkon roven součtu výkonů v jednotlivých fázích. Platí tedy

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (3.10)$$

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

3.3.2 Elektrický výkon synchronního motoru

V případě výpočtu výkonu elektrického motoru je potřeba vytvořit model jeho vinutí. Synchronní motor s permanentními magnety je možné zjednodušeně modelovat jako stejnosměrný (DC) motor. Jeho elektrické schéma je na obrázku 3.2.



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

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

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

$$p(t) = i(t)u(t) = i(t) \left(i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \right) \quad (3.12)$$

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

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) \quad (3.13)$$

kde n je počet motorů.

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)[5]. Tento nástroj byl vyvinut na univerzitě v Dillí a je bezplatně k dispozici ke stažení a použití v MATLABu. Je schopen generovat rovnice pro libovolný počet os a to jak pro rotační, tak lineární osy.

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

3.5 Modifikované DH parametry robota

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

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

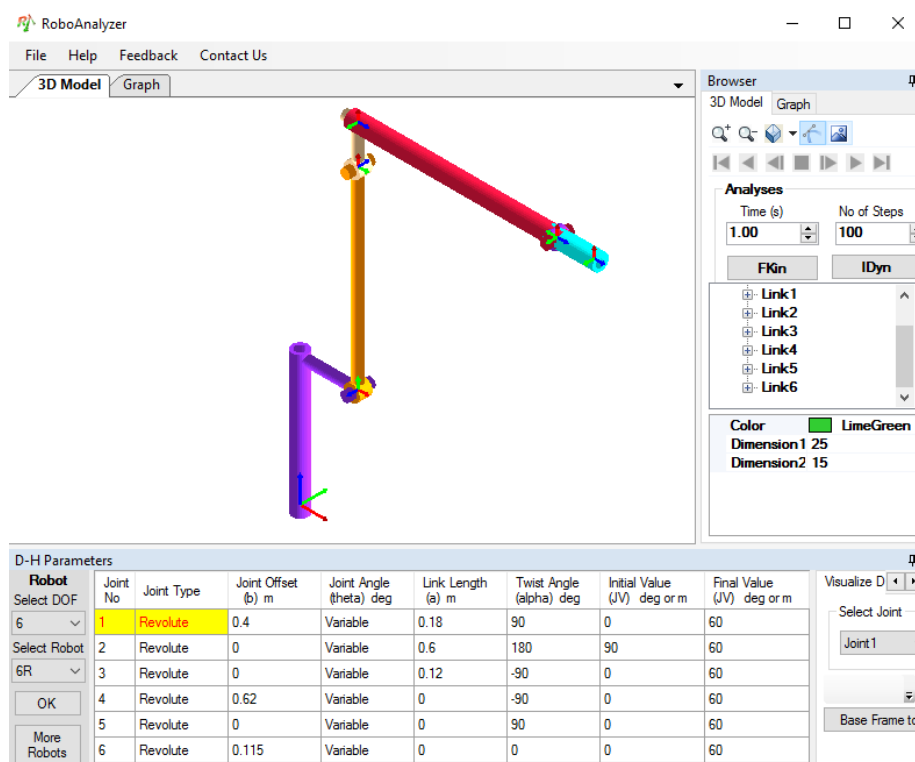
V tabulce č.3.1 je DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc použita v nástroji ReDySim.

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

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.

Pro vizualizaci DH parametrizace je možné použít nástroj RoboAnalyzer [[6]], který byl vyvinut společně se solverem ReDySim pro účely vizualizace a simulace. RoboAnalyzer umožňuje simulovat jednoduché pohyby robota s až 7 osami a vykreslovat průběhy stavů jako jsou polohy, rychlosti, zrychlení a momenty sil na jednotlivých osách. Vizualizace použité DH parametrizace pro robota KUKA KR5 Arc v prostředí RoboAnalyzer je na obrázku 3.3.



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

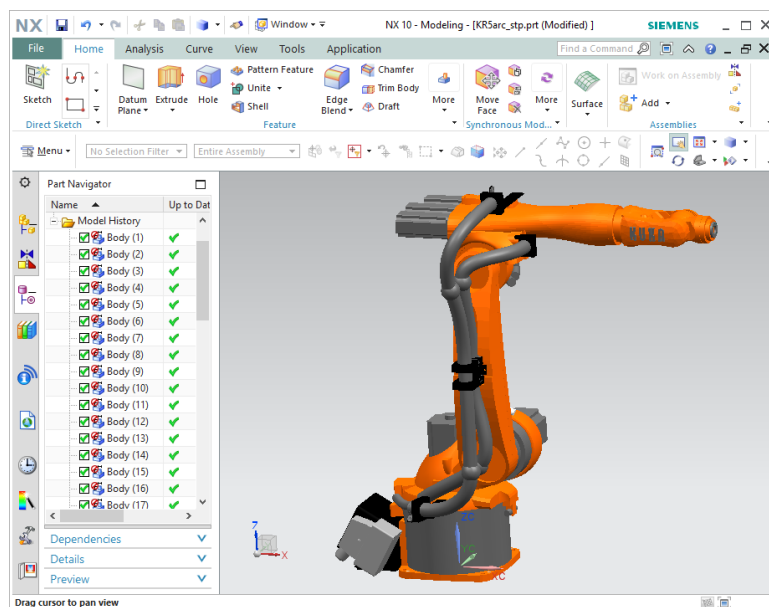
Určení parametrů takovýmto způsobem je ale možné pouze u jednoduchých laboratorních modelů robota tvořených malým počtem součástí. U větších a složitějších robotů jako jsou průmyslové manipulátory je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivá ramena sestávají z více komponent, jako jsou samotné kostry ramen, převodovky motorů, napájecí a komunikační vedení motorů atd. 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 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. Ty je možné analyzovat v nástrojích CAD jako je například AutoCAD nebo Siemens NX, které jsou schopny počítat momenty setrvačnosti a hmotnosti libovolně složitých objektů. Výhodou tohoto postupu je jeho rychlost a jednoduchost. Navíc je takto možné získat požadované parametry i bez nutnosti přístupu k opravdovému fyzickému robotu. Tento postup je také možné zobecnit na libovolný typ robota. Stačí k němu jen mít jeho odpovídající 3D model. 3D model robota KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0 je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: 3D model robota 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 ani typu použitých materiálů, jejich skutečné hmotnosti nebo jejich hustoty. Je sice možné považovat jednotlivá ramena robota za homogenní a hmotnost odhadnout z celkové hmotnosti robota udávané 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 postup je zde použit pouze pro účely porovnání určených hodnot.

■ 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 $[\theta][\dot{\theta}][\ddot{\theta}]$. 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

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

Počet neznámých parametrů je možné zredukovat. Je to dáno tím, že některé parametry dynamiku robota neovlivní. 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 a také její hmotnost a polohu jejího těžiště. Zároveň je možné si model zjednodušit uvažováním pouze prvků na hlavní diagonále tenzorů setrvačnosti a zanedbáním prvků mimo ni.

Díky tomu klesne počet neznámých parametrů v případě šestiosového robota 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 vykonat pohyb na robotu po nějaké trajektorii a měřit polohy, úhlové rychlosti, úhlová zrychlení a momenty sil na jednotlivých osách. Do matice H se poté dosadí 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 na trajektorii více bodů a jejich následným dosazením do rovnice 4.2 v různých časech. Důležité je na trajektorii mít tolik bodů, aby z této rovnice vznikla rovnice přeurčená. Takovou 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

Odhadované parametry vypočítané výše popsaným postupem jsou ale silně závislé na zvolené trajektorii, na které jsou měřeny dynamické veličiny.

Aby se tímto způsobem správně odhadly všechny neznámé parametry, je potřeba s robotem provést pohyby po takové trajektorii, na které by byly vybudeny všechny dynamické složky robota, tzn. aby se do dynamiky promítly všechny neznámé parametry. Nedostatečně excitující trajektorie sice dá nějaké výsledky, ty budou ale platit pouze pro pohyby po této trajektorii nebo jejím okolí.

Ve vědeckých člancích a v jiných publikacích např. [10][4][7] se na jednotlivých osách doporučují trajektorie, které je možné popsat konečnou Fourierovou řadou. Jejich výhodou je, že díky vlastnostem harmonické funkce jsou poté jednotlivé polohy, rychlosti i zrychlení rovněž kombinací harmonických průběhů. Tím se maximalizuje vliv hledaných dynamických parametrů a minimalizuje 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 pouze nastavit sadu požadovaných poloh os, kterých musí osy dosáhnout a rychlosti/zrychlení, s jakými se má tento pohyb vykonat. Z toho 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 popsáným výše v sekci 4.1.3.

Pomocí nástroje ReDySim se vygenerovala soustava šesti rovnic dynamiky robota. Protože ReDySim neuvažuje tření na jednotlivých osách, bylo nutné toto tření do vygenerovaných rovnic doplnit ručně. 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, 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.

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 trajektorií, identifikaci parametrů a simulaci výsledků.

Skript je rozdělen na několik po sobě jdoucích podprogramů, které jde 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 robota s rotačními osami. Určují se zde základní parametry robota, jako je počet os, délky jednotlivých ramen, parametry převodovek a počet měřených veličin. Dále se zde zadávají vlastnosti motorů, mezi něž patří momentové konstanty a odpory a indukčnosti vinutí.

Další část je částečně závislá na použitém robotu. V této části se načítá změřená trajektorie robota. Robot KUKA KR5 Arc používá k měření trajektorií nástroj TRACE. Tento nástroj ukládá 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 roboti od jiných výrobců budou pravděpodobně mít změřené trajektorie uložené v jiných formátech a jiným způsobem. Proto je potřeba v případě použití jiného robota skript upravit nebo doplnit pro správné načítání těchto dat. Výsledkem této části je matice naměřených trajektorií pro jednotlivé osy a veličiny.

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

Nejprve je vytvořen vektor P 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 $H_i(\ddot{\theta}(t), \dot{\theta}(t), \theta(t))$ se symbolickými proměnnými, do kterých je možné dosazovat změřená data.

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

Tyto vektory a matice jsou poté předány solveru `lsqlin`, který vypočte vektor P řešením rovnice 4.2 metodou nejmenších čtverců. Zároveň je zde možné nastavit horní i spodní hranice jednotlivých parametrů vektoru P ve kterých má solver řešení hledat.

Odvozené 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.

4.4 ***** Vliv odchylek *****

Vliv odchylek v hodnotách parametrů na přesnost energetického modelu robotu je analyzován pomocí metody Monte Carlo. Ke každému z parametrů je náhodně přičteno 10 hodnot z rozsahu $p \in [-0.25P_i, 0.25P_i]$ se kterými je poté provedena simulace a vypočítaná střední odchylka mezi simulací a změřenými průběhy. Následně je vyhodnoceno, při jakých odchylkách parametrů byl největší rozdíl mezi simulovaným a změřeným průběhem.

Kapitola 5

Identifikované parametry

Postupem popsaným v sekci 4.2 se podařilo identifikovat 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 robota (viz sekce 4.1.2). Hodnoty v tabulkách jsou uvedeny v základních jednotkách SI.

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 identifikovaných parametrů 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 identifikovaných parametrů z 3D modelu

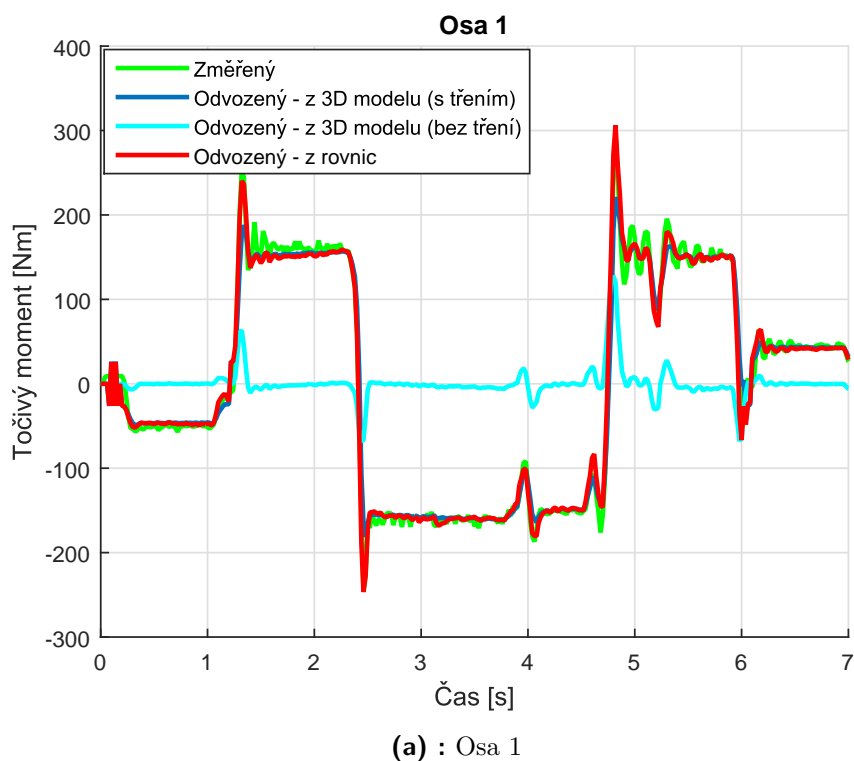
Porovnáním hodnot v obou tabulkách je patrné, že se většina parametrů, snad jen s výjimkou hmotností ramen, poměrně výrazně liší. Dalším rozdílem je, že z 3D modelu není možné získat informace o koeficientech tření v jednotlivých osách, zatímco odvození z rovnic s třením počítá. Jak bude patrné ze simulace odvozených parametrů, tření má na dynamiku nezanedbatelný vliv.

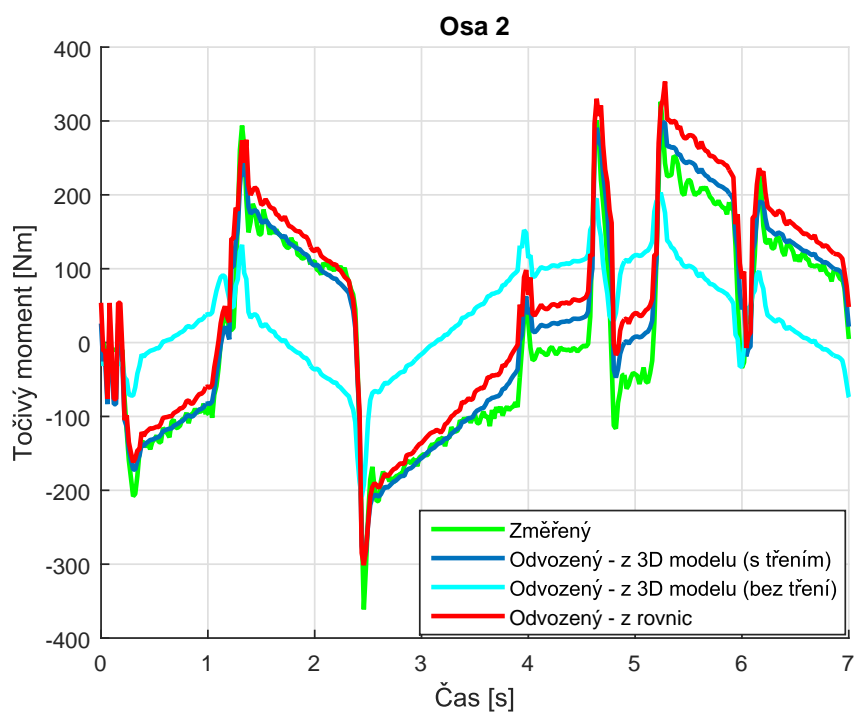
5.1 Simulace odvozených parametrů

Na následujících obrázcích (obr. 5.2a až 5.2f) 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. Ty jsou srovnány se skutečnými naměřenými momenty sil.

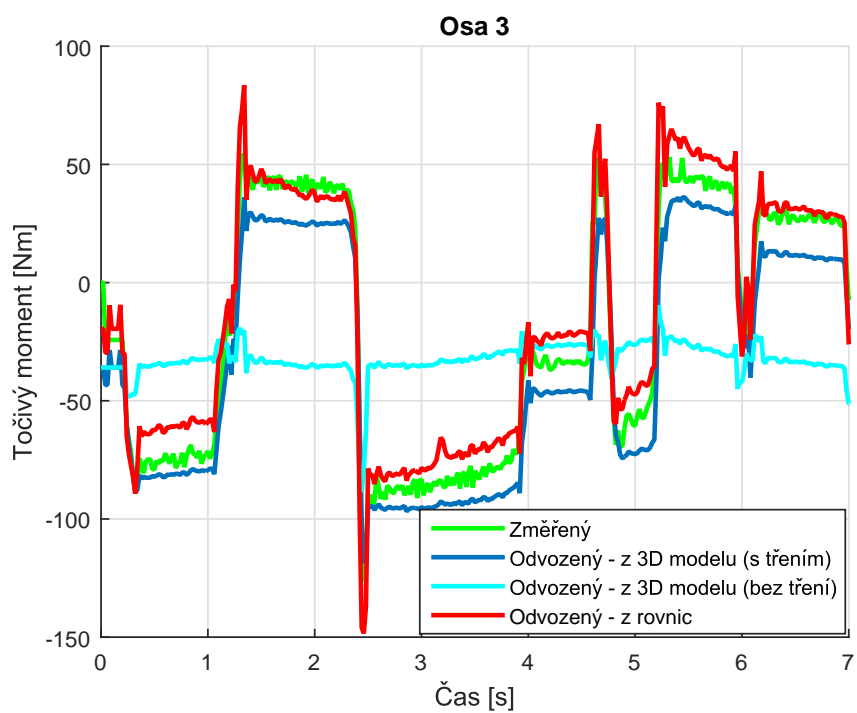
Protože z 3D modelu není možné získat koeficienty tření os, je zde možnost uvažovat tyto koeficienty jako nulové a tím je v modelu zanedbat. Tento model je ale velmi nepřesný (viz průběhy níže). Na průbězích je vidět, že vychází opravdu velmi vysoké odchylky od naměřených dat. Tření os hraje v dynamice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

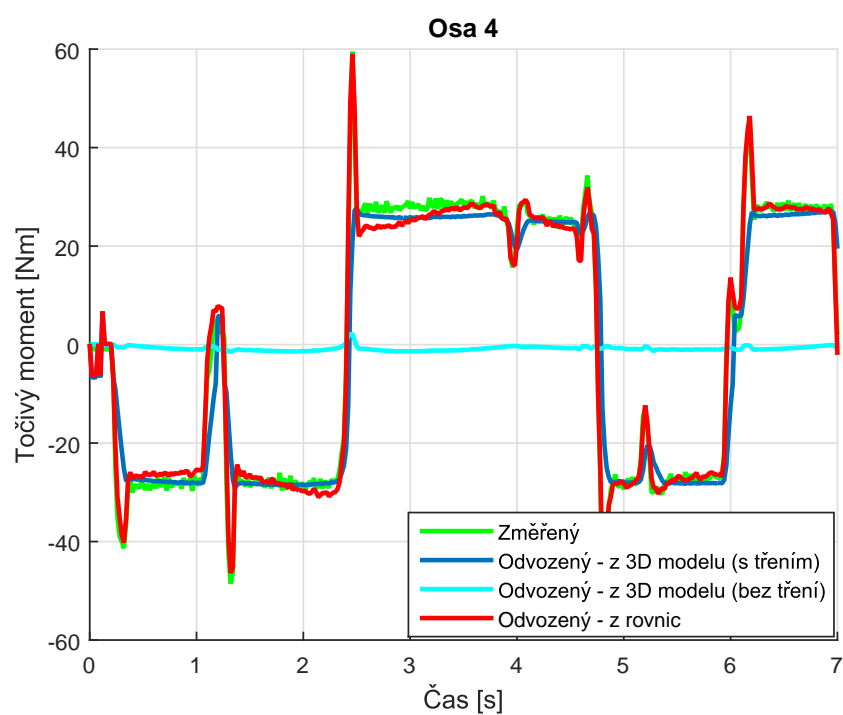




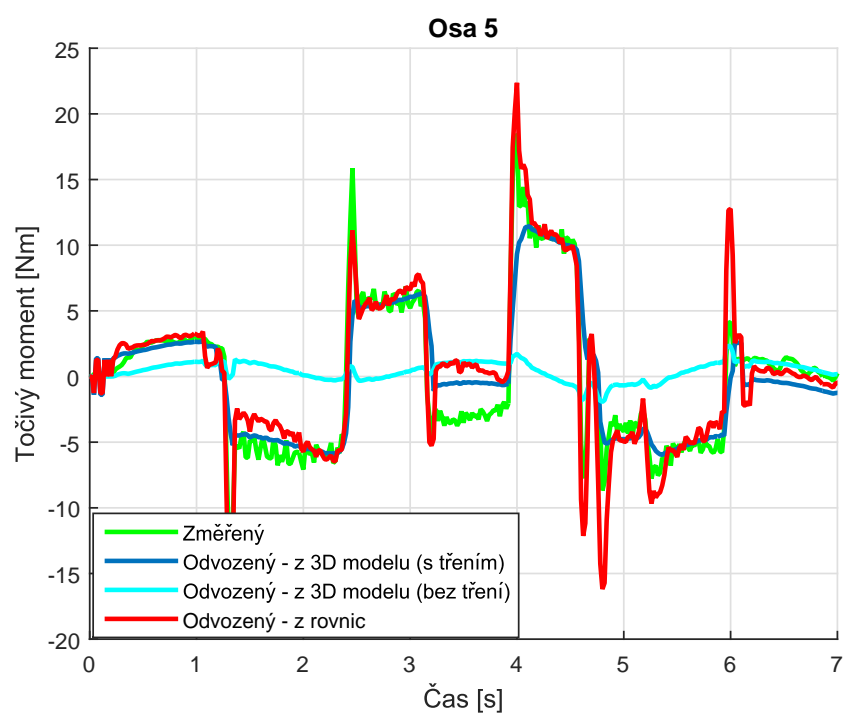
(b) : Osa 2



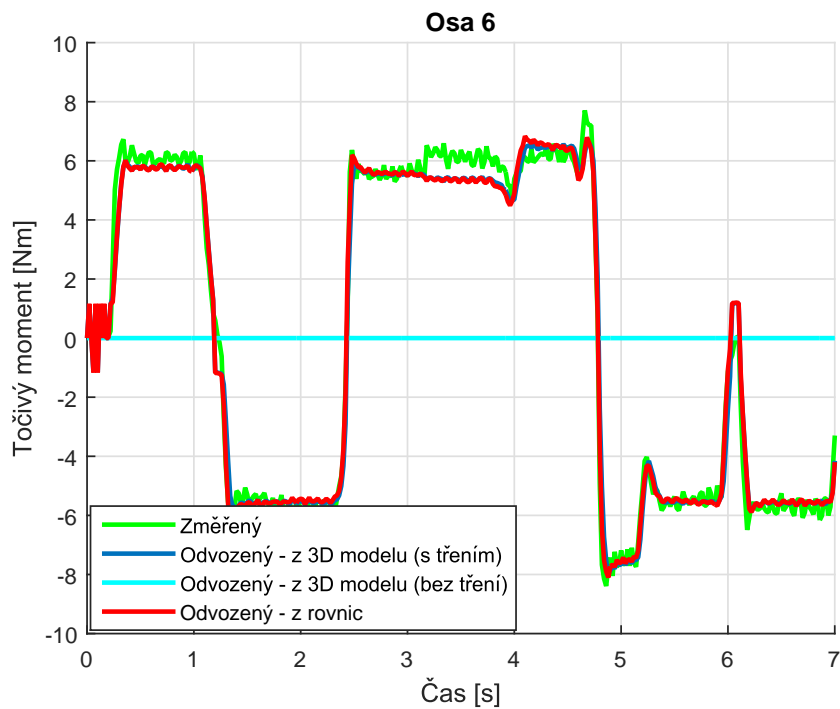
(c) : Osa 3



(d) : Osa 4



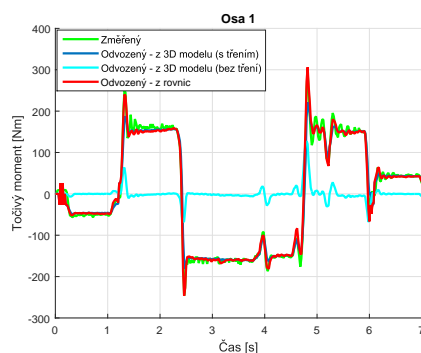
(e) : Osa 5



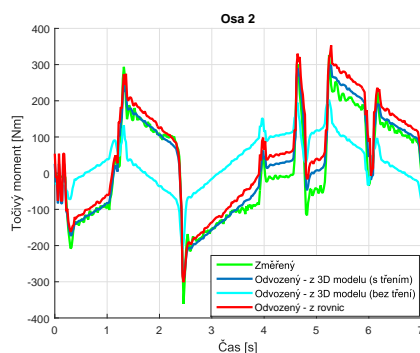
(f) : Osa 6

Obrázek 5.1: Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry

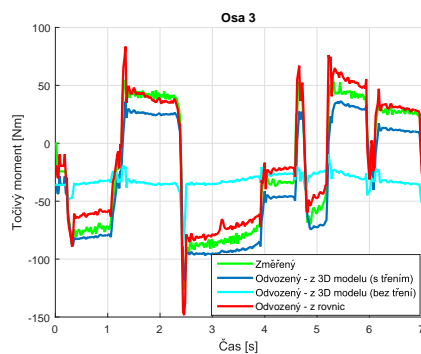
Z výše uvedených průběhů je patrné, že vypočítané a naměřené průběhy si poměrně odpovídají. Ve všech případech se průměrná odchylka pohybuje kolem jedné desetiny Nm a maximální okamžitá odchylka nepřesahuje šest desetin Nm.



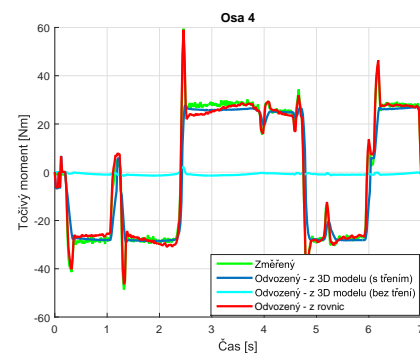
(a) : Osa 1



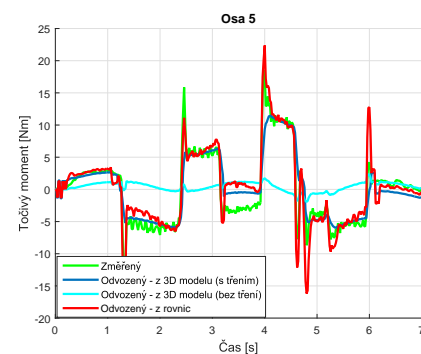
(b) : Osa 2



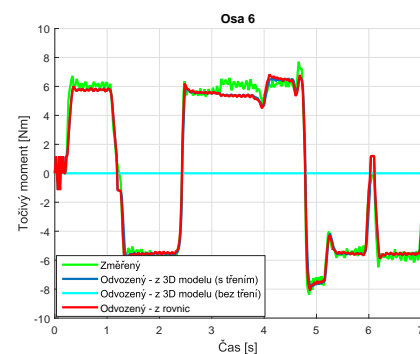
(c) : Osa 3



(d) : Osa 4



(e) : Osa 5



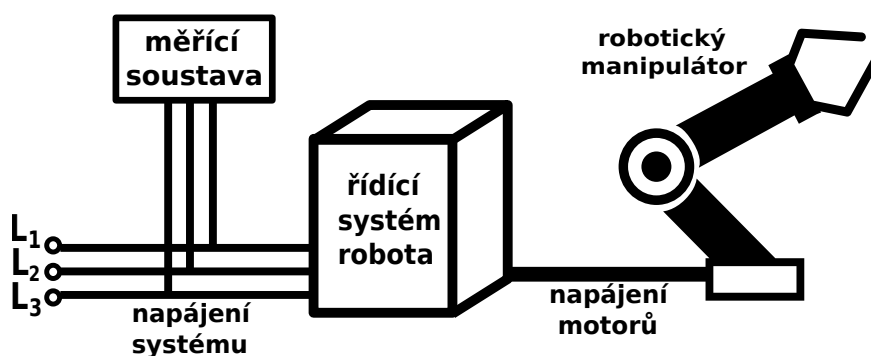
(f) : Osa 6

Obrázek 5.2: Srovnání měření se simulacemi s odvozenými parametry

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 6.1. Měřicí sestava je připojena na svorky napájecího vedení mezi elektrickou zásuvkou a skříní s řízením a napájením robota. Sestava je tvořena mařicí 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 3.10 roven součtu výkonů všech jednotlivých fází. Měření výkonu je prováděno s přesností na desetiny wattu. Vzorkovací perioda měření je 40 ms.

Ma

• 1



Ob

•

Pr

Kompletní program pro sběr měřených dat a jejich odesílání v síti Profinet byl vytvořen Ing. Vojtěchem Pavlíkem v rámci jeho diplomové práce [[1]].

Programování a konfigurace PLC je prováděna pomocí nástroje TIA Portal společnosti SIEMENS. Podrobné informace k PLC S7-300 jsou k dispozici v jeho dokumentaci [[8]].

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 čte 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 je potřeba 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 libovolné platformě.



Kapitola 7

Srovnání výsledků

Kapitola 8

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.

8.1 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.

8.2 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 [1]. Protože aplikace nevyužívá žádné platformě závislé knihovny a příkazy, je možné ji zkompilovat a používat na UNIX-ových platformách i na platformě MS Windows.

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 8.1.

```

//===== 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 8.1: 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 prostředku na počítačích s vícevláknovými a vícejádrovými procesory. Každému vláknu 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.

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 9

Závěr



9.1 Výsledky práce



9.2 Práce do budoucna



Reference

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] KUKA Roboter GmbH. - KUKA KR5 ARC. 2016. URL http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/low/kr5_arc/start.htm.
- [4] Ngoc Dung Vuong, Marcelo H. Ang Jr. - Dynamic Model Identification for Industrial Robots. 2009.
- [5] Recursive Dynamics Simulator (ReDySim). 2017. URL <http://www.redysim.co.nr/>.
- [6] RoboAnalyzer. 2017. URL <http://www.roboanalyzer.com/>.
- [7] R. van der Aalst. - Dynamic identification of a Mitsubishi PA-10 robotic manipulator. 2008.
- [8] SIMATIC S7-300 CPU 315-2 PN/DP - Datasheet. 2017. URL <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7315-2EH14-0AB0>.
- [9] WAGO-I/O-SYSTEM 750 - Manuál. 2017. URL http://www.wago.com/wagoweb/documentation/750/eng_manu/modules/m07500494_0en.pdf.
- [10] 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.