

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	7 Srovnání výsledků	25
2 Robotický systém	3	8 Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby	27
3 Dynamický model	5	8.1 Databáze MongoDB.....	27
3.1 Pohybové rovnice	5	8.2 Aplikace MongoDB data exporter	27
3.2 Solver ReDySim	7	9 Závěr	31
3.3 Modifikované DH parametry robota.....	7	Reference	33
3.4 Elektrický výkon	8		
3.4.1 Elektrický výkon v třífázové soustavě	8		
3.4.2 Elektrický výkon synchronního motoru	9		
4 Identifikace systému	11		
4.1 Způsoby identifikace	11		
4.1.1 Z přímého měření součástí robota	11		
4.1.2 Z 3D modelu	12		
4.1.3 Z rovnic	13		
4.2 Excitační trajektorie	14		
4.3 Postup identifikace.....	15		
5 Odvozené parametry	17		
5.1 Simulace odvozených parametrů	18		
6 Měření elektrického výkonu	21		
6.1 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750	22		
6.2 PLC Siemens S7-300	22		
6.3 Aplikace DEPO	23		

Obrázky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [2].	3
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [2].	4
3.1 Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.	8
3.2 Elektrické schéma vinutí synchronního motoru.	9
4.1 3D model robota KUKA KR5 Arc v prostředí Siemens NX 10.0.	12
5.1 Točivé momenty pro osu 6.	18
5.2 Točivé momenty pro osu 5.	18
5.3 Točivé momenty pro osu 4.	19
6.1 Schéma zapojení soustavy pro měření výkonu.	21
6.2 Měřicí karta WAGO-I/O-SYSTEM 750.	22
8.1 Ukázka prostředí aplikace MongoDB data exporter.	28

Tabulky

3.1 Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.	7
4.1 Tabulka nezámych parametrů robota KUKA KR5 Arc.	14
5.1 Tabulka odvozených parametrů .	17



Kapitola 1

Úvod

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.

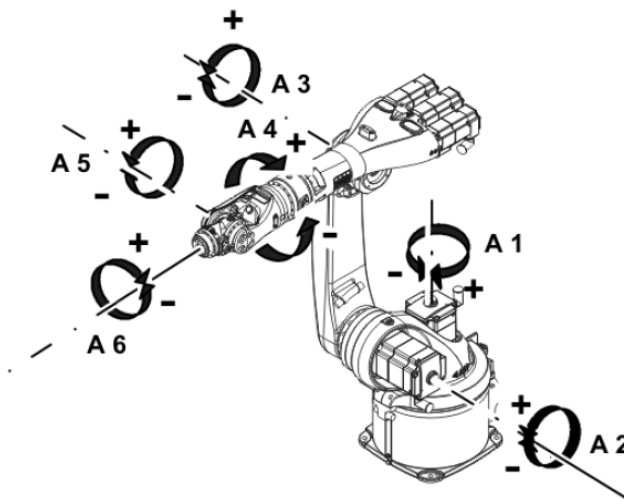
Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Díky tomu je robot schopen vykonávat široké spektrum operací, které je schopen vykonávat člověk. Konfigurace os robota je zobrazena na obrázku 2.2.



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

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

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 sil působících na jednotlivé osy

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

f_v je vektor koeficientů viskózního tření v jednotlivých osách

f_c je vektor koeficientů Coulombova suchého tření v jednotlivých osách

n je počet os

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

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

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

kde

$T(t)[Nm]$ moment síly motoru

$K[Nm/A]$ momentová konstanta

$I(t)[A]$ proud protékající motorem

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

3.2 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.

3.3 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.

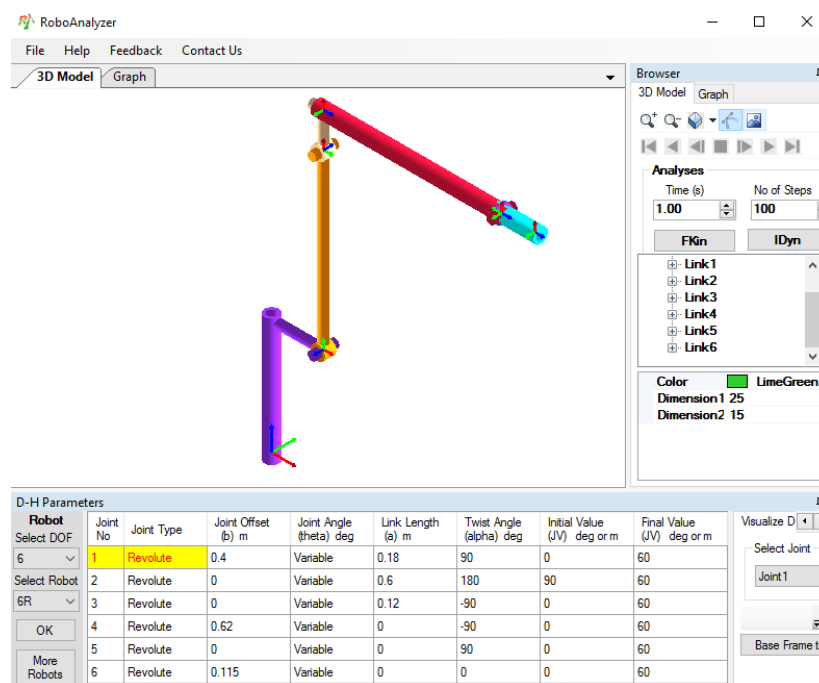
Osa	$a_i[m]$	$b_i[m]$	$\alpha_i[^\circ]$	$\theta_i[^\circ]$
1	0.18	0.4	90	-
2	0.6	0	180	-
3	0.12	0	-90	-
4	0	0.62	-90	-
5	0	0	90	-
6	0	0.115	0	-

Tabulka 3.1: Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc.

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

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 3.1.



Obrázek 3.1: Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc.

3.4 Elektrický výkon

3.4.1 Elektrický výkon v třífázové soustavě

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

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (3.3)$$

kde v případě harmonického střídavého napětí a proudu platí

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

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

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

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

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

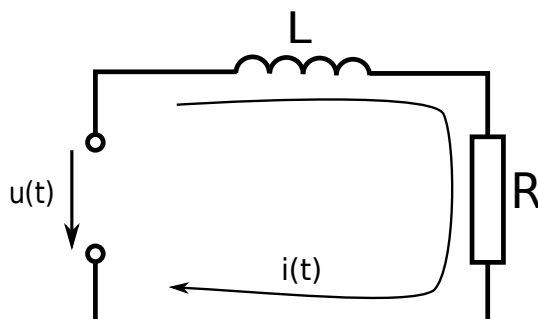
V případě třífázové soustavy je její celkový výkon roven součtu výkonů na jednotlivých fázích. Platí tedy

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (3.6)$$

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

3.4.2 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.

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

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

Celkový okamžitý elektrický výkon při pohybu robota je poté dán jako

součet okamžitých výkonů na všech jeho motorech

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

kde N je počet motorů.

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.

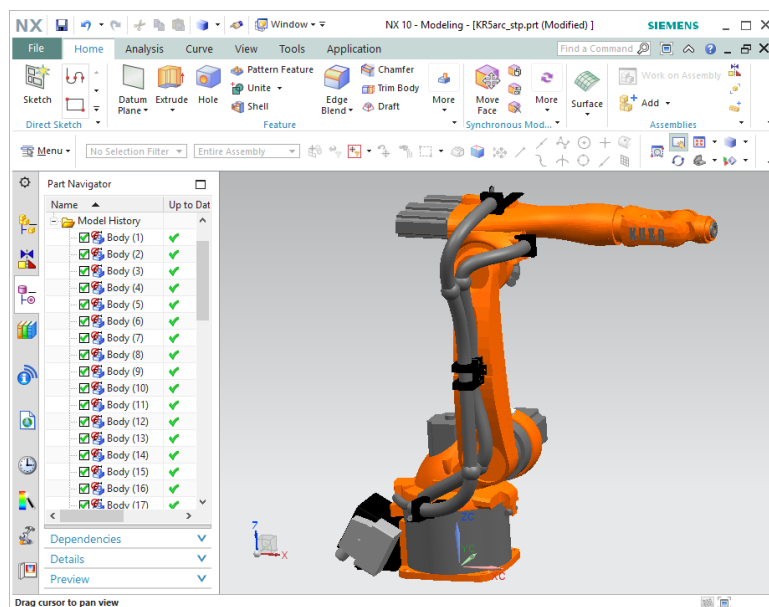
Určení parametrů takovýmto způsobem je ale možné pouze u jednoduchých laboratorních modelů robota tvořených malým počtem součástí. U větších a složitějších robotů jako jsou průmyslové manipulátory je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivá ramena sestávají z více komponent, jako 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 3.1 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

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

kde

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

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

4.2 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.

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.

4.3 Postup identifikace

Pro účely identifikace robota KUKA KR5 Arc byl vytvořen skript pro použití v MATLABu, který umožňuje vytvoření dynamického modelu, identifikaci parametrů a simulaci výsledků.

...

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

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

Kapitola 5

Odvozené parametry

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

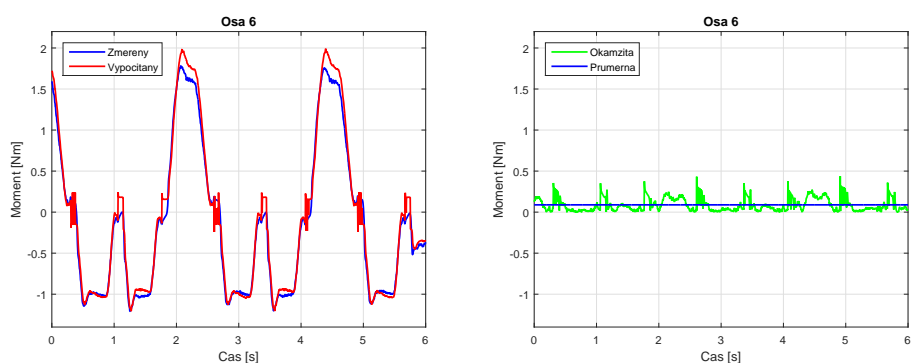
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1			x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	0	0	0.013	0.0053	-0.001	x	0	0.1516	0.2757
5	0	0.013	0.0135	-0.0017	0.007	0.001	0	0.0739	0.1576
6	0.0065	0.007	0.0049	-0.0047	-0.0012	-0.0039	0.0055	0.0835	0.1926

Tabulka 5.1: Tabulka odvozených parametrů

5.1 Simulace odvozených parametrů

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

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

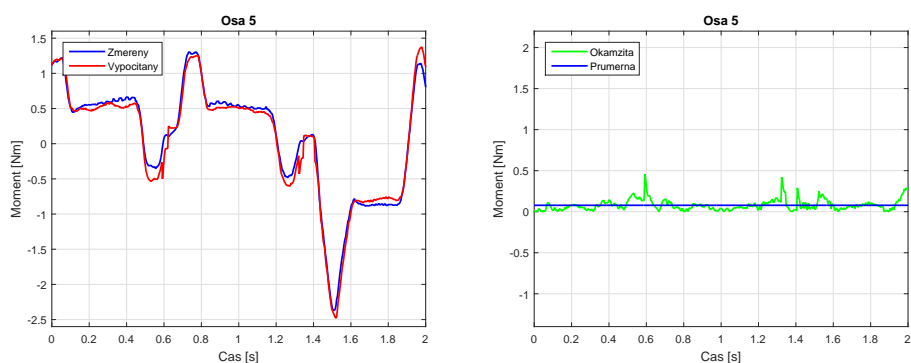


(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.1: Točivé momenty pro osu 6.

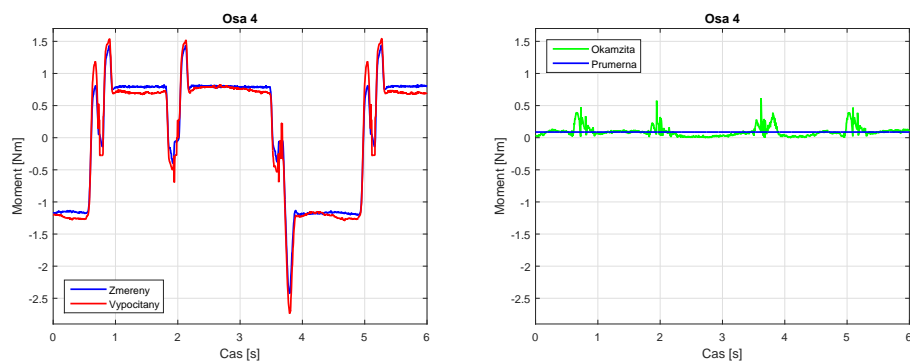
Stejné průběhy pro osu 5 jsou na obrázku 5.2 a pro osu 4 na obr. 5.3.



(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.2: Točivé momenty pro osu 5.



(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

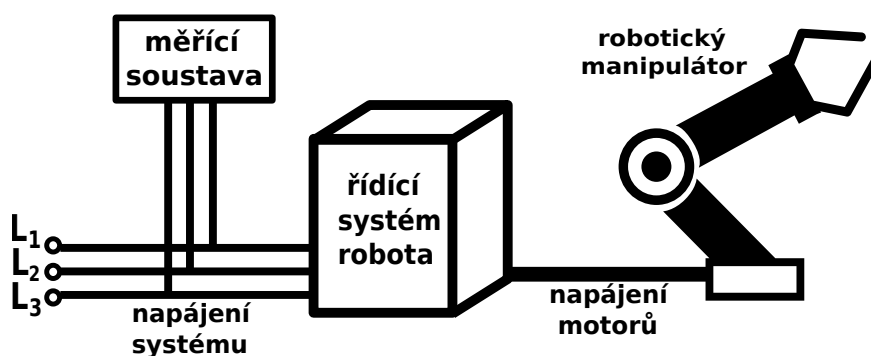
Obrázek 5.3: Točivé momenty pro osu 4.

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

Kapitola 6

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 3.6 roven součtu výkonů všech jednotlivých fází. Měření výkonu je prováděno s přesností na desetiny wattu. Vzorkovací perioda měření je 40 ms.

Mā

2.1



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 jí 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

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

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

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.

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.

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



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.