Diplomová práce



České vysoké učení technické v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická Katedra řídicí techniky

Identifikace 6-osého průmyslového robotu

Bc. Andrej Suslov

Vedoucí práce: Ing. Martin Ron

Květen 2017

Poděkování

Prohlášení

Díky

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

V Praze, 24. května 2017

Abstrakt .

text abstraktu cesky

Klíčová slova: robot, 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
2 Robotický systém	3
3 Dynamický model	5
3.1 Pohybové rovnice	5
3.2 Solver ReDySim	7
3.3 Modifikované DH parametry robota	7
3.4 Elektrický výkon	8
3.4.1 Obecný vztah	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	12
4.2 Excitační trajektorie	13
4.3 Postup identifikace	14
5 Odvozené parametry	15
5.1 Simulace odvozených parametrů	16
6 Měření elektrického výkonu	19
6.1 Měřící karta WAGO-I/O-SYSTEM 750	1 20
6.2 PLC Siemens S7-300	20
6.3 Aplikace DEPO	21

7 Srovnání výsledků	23
8 Příprava dat z databáze měření energetické spotřeby	25
8.1 Databáze MongoDB	25
8.2 Aplikace MongoDB data exporte	r 25
9 Závěr	29
Reference	31

Obrázky Tabulky

2.1 Robot KUKA KR5 Arc. Převzato z [2]
2.2 Konfigurace os robota. Převzato z [2]
3.1 Vizualizace DH parametrizace robota KUKA KR5 Arc 8
3.2 Elektrické schéma vinutí synchronního motoru 9
5.1 Točivé momenty pro osu 6 16
5.2 Točivé momenty pro osu 5 16
5.3 Točivé momenty pro osu 4 17
6.1 Schéma zapojení soustavy pro měření výkonu
6.2 Měřící karta WAGO-I/O-SYSTEM 75020
8.1 Ukázka prostředí aplikace MongoDB data exporter 26

3.1 Tabulka DH parametrů KUKA KR5 Arc	7
4.1 Tabulka nezámých parametrů	13
5.1 Tabulka odvozených parametrů .	15

Kapitola 1 Úvod

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.

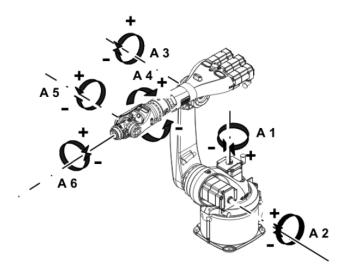
Osy robota jsou uspořádány tak, že jsou schopny napodobit stavbu a pohyb lidské paže. Díky tomu je robot schopen vykonávat široké spektrum operací, které je schopen vykonávat člověk. Konfigurace os robota je zobrazena na obrázku 2.2.



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 m 3 . 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 brzdným mechanismem, který zabraňuje otáčení os, pokud není robot v aktivním pohybu.

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

Celý systém je napájen z třífázové soustavy elektrické energie. Je určen pro montáž na zem nebo strop ve vnitřních prostorách. Podrobnější informace je možné nalézt v katalogovém listu. [2].

Dynamický model

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

3.1 Pohybové rovnice

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

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

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

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

Rovnice systému je možné zapsat v následujícím maticovém tvaru jako

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

3. Dynamický model

kde

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

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

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

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

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

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

 f_v je vektor koeficientů viskózního tření v jednotlivých osách

 $f_c\,$ je vektor koeficientů Coulombova suchého tření v jednotlivých osách

n je počet os

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

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

kde

T(t)[Nm] moment sily 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.

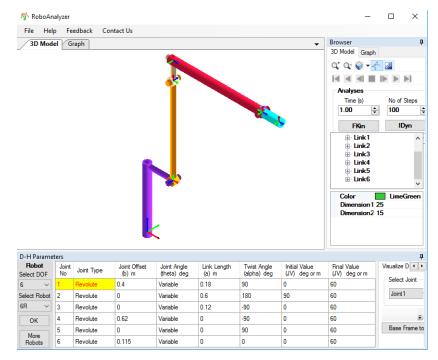
Osa	$a_i[m]$	$b_i[m]$	$\alpha_i[^\circ]$	$ heta_i[^\circ]$
1	0.18	0.4	90	-
2	0.6	0	180	-
3	0.12	0	-90	-
4	0	0.62	-90	-
5	0	0	90	-
6	0	0.115	0	-

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 Obecný vztah

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

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

kde v případě harmonického střídavého napětí a proudu platí

$$u(t) = U_m cos(\omega t + \phi)$$

$$i(t) = I_m cos(\omega t + \phi + \psi)$$
(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

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

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

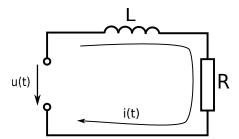
V případě třífázové soustavy je její celkový výkon roven součtu výkonů na jednotlivých fázích. Platí tedy

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

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

3.4.2 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

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

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

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

kde N je počet motorů.

Identifikace systému

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

4.1 Způsoby identifikace

Z toho důvodu je nutné tyto parametry nějakým způsobem 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 je tento způsob náročný časově i způsobem provedení. Jednotlivé linky sestávají z více komponent, jako jsou převodovky motorů, napájecí a komunikační vedení motorů atd. Ty dále sestávají z dalších komponent.

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

4.1.2 Z 3D modelu

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

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

4.1.3 Z rovnic

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

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

kde

 $T = \begin{bmatrix} T_1 \cdots T_n \end{bmatrix}^T$ je vektor momentů

 $P = \left\lceil P_1 \cdots P_n \right\rceil^T$ je vektor neznámých dyn. parametrů jednotlivých os

a
$$P_i = \begin{bmatrix} I_{ixx} & I_{ixy} & I_{iyy} & I_{iyz} & I_{izz} & I_{izx} & m_i r_{ix} & m_i r_{iy} & m_i r_{iz} & m_i f_{vi} & f_{ci} \end{bmatrix}^T$$

kde

 $I_{ijk}\,$ je složka setrvačnosti pro linkivůči souřadnicímja k

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

 m_i je hmotnost linku i

 f_{vi} je koeficient viskózního tření linku i

 f_{ci} je koeficient Coulombova tření linku i

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

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

Osa	Neznámé parametry								
1							I_{1z}	f_{v1}	f_{c1}
2	I_{2xx}	I_{2yy}	I_{2zz}	d_{2x}	d_{2y}	d_{2z}	m_2	f_{v2}	f_{c2}
	I_{3xx}								
4	I_{4xx}	I_{4yy}	I_{4zz}	d_{4x}	d_{4y}	d_{4z}	m_4	f_{v4}	f_{c4}
	I_{5xx}								
	I_{6xx}								

Tabulka 4.1: Tabulka nezámých parametrů

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

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

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

4.2 Excitační trajektorie

Aby bylo možné robota takto identifikovat, je potřeba s robotem provést takové pohyby, aby byly vybuzeny všechny dynamické složky robota, tzn. aby se projevily všechny neznámé parametry. Ve vědeckých článcích a v jiných publikacích např. [10][4][7] se na jednotlivých osách doporučují průběhy, které je možné popsat konečnou Fourierovou řadou. Jejich výhodou je, že díky vlastnostem harmonické funkce jsou poté jak polohy, tak i rychlosti a zrychlení rovněž kombinací harmonických průběhů a tím se minimalizuje vliv šumu měření.

Protože se robot používá převážně pro polohování, jeho řídící systém zpravidla neumožňuje na osách provádět čistě harmonické průběhy. Řídící systém robota KUKA KR5 umožňuje pouze nastavit požadované koncové polohy os a rychlosti/zrychlení, s jakými jich má robot dosáhnout. Z toho důvodu je

4. Identifikace systému

nutné robotu poskytnout sérii bodů popisujících harmonický průběh. Výsledná trajektorie robota poté bude pouze aproximací harmonického průběhu.

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

4.3 Postup identifikace

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

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

Odvozené parametry

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

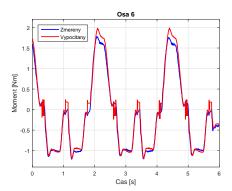
Osa	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	d_x	d_y	d_z	m	f_v	f_c
1			X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	0	0	0.013	0.0053	-0.001	X	0	0.1516	0.2757
5	0	0.013	0.0135	-0.0017	0.007	0.001	0	0.0739	0.1576
6	0.0065	0.007	0.0049	-0.0047	-0.0012	-0.0039	0.0055	0.0835	0.1926

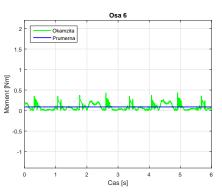
Tabulka 5.1: Tabulka odvozených parametrů

5.1 Simulace odvozených parametrů

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

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



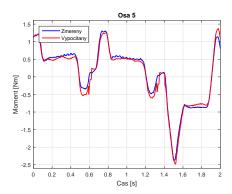


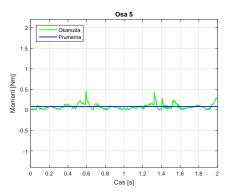
(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.1: Točivé momenty pro osu 6.

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

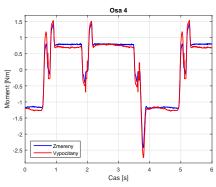


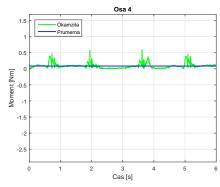


(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.2: Točivé momenty pro osu 5.





(a) : Srovnání naměřených a vypočítaných momentů

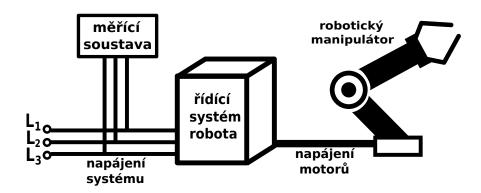
(b) : Okamžitá a průměrná odchylka

Obrázek 5.3: Točivé momenty pro osu 4.

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

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. Měřící sestava je připojena na svorky napájecího vedení mezi elektrickou zásuvkou a skříní s řízením a napájením robota. Sestava je tvořena mařící kartou WAGO-I/O-SYSTEM 750 připojenou k průmyslovému PLC Siemens S7-300 CPU 315-2PN/DP. Měřící 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.

6.1 Měřící karta WAGO-I/O-SYSTEM 750

Měřící karta WAGO-I/O-SYSTEM 750 [[9]] je určena pro měření elektrických parametrů 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 pro každou fázi zvlášť. Měření proudu je prováděno pomocí proudového transformátoru převádějícího proud na napětí.

Kartu je možné nakonfigurovat pro současné měření až 4 elektrických veličin jako je AC a DC 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 z rozsahu 1. a 41. harmonické.



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

Změřené veličiny posílá karta přímo na vstupy připojeného PLC, které je dále zpracovává. Měřící karta se vstupními svorkami je na obrázku 6.2. Technické parametry a podrobnější informace o použití karty je možné nalézt v manuálu [[9]].

6.2 PLC Siemens S7-300

Průmyslové PLC Siemens S7-300 CPU 315-2PN/DP [[8]] 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 poté ještě opatřena časovou známkou udávající čas o tom, kdy byla data vytvořena. Celá zpráva je poté poslána jako jeden paket pomocí protokolu UDP v síti Profinet.

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 skriptovací programovacím jazyce RUBY. Spouští se pomocí příkazového řádku na osobním počítači připojeném k Ethernetové síti, ke které je připojeno i měřící PLC.

Aplikace čte data odesílaná měřícím 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 měřícího 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

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 [[]]. 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:
 Chosen collection to export:
                              kvasiny_pricna_stena
 Chosen number of threads/output files:
  Total number of items in database: 33283
 Counting boundaries ...
// Done.
 You are about to export 32464 items
  from the beginning
  to 17.01.04 12:15
 from collection: "kvasiny_pricna_stena"
from database: "depo"
  into file: "C:/mongodb_program/data_export.csv"
  Do you want to make a backup of "kvasiny_pricna_stena"? (Y/n) n
  Backup will not be made.
  Do you want to start the data export (Y/n)? Y
  Commencing data export.
               0 of 32464
  Remaining:
// 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 prostředků 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 přidané 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 standard nápovědu (help), kterou je možné spustit použitím parametru -h pri 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_xxxxxxxx_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.