

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 557*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**?**  
**IS**

*Ing. Anna Smetanová*

**Optimalizace energie  
při pohybu robotu**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

**Ing. ANNA SMETANOVÁ**

**OPTIMALIZACE ENERGIE PŘI POHYBU ROBOTU**

OPTIMIZATION OF ENERGY BY ROBOT MOTION

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství (3909V001)

Školitel: prof. Ing. ZDENĚK KOLÍBAL, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Jiří Skařupa, CSc.  
prof. Ing. Juraj Smrček, Ph.D.  
doc. RNDr. Zdeněk Karpíšek, CSc.,

Datum obhajoby: 30. 10. 2009

## **Klíčová slova**

Robot, pohyb, spotřeba energie

## **Keywords**

Robot, Motion, Energy Consumption

## **Místo uložení práce**

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

## OBSAH

OBSAH .....	3
ÚVOD .....	5
1. CÍL A METODIKA DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	5
1.1. Cíl práce .....	5
1.2. Metodika řešení .....	5
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY .....	6
2.1. Průmyslové roboty .....	6
2.2. Programování robotů .....	7
3. VLIV PARAMETRŮ POHYBU NA SPOTŘEBU ENERGIE .....	8
3.1. Zjednodušující předpoklady .....	8
3.2. Rovnoměrný přímočarý pohyb .....	8
3.3. Rovnoměrně zrychlený pohyb .....	10
4. POPIS PRACOVIŠTĚ .....	12
4.4. Robot IRB4400/60 .....	12
4.5. Měřicí zařízení .....	13
5. PROGRAMOVÁNÍ DRÁHY TCP .....	14
6. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ SPOTŘEBY ENERGIE .....	15
6.4. Průběh měření .....	15
6.5. Zpracování výsledků měření .....	16
7. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNĚ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ .....	17
8. NÁVRH METODY NASTAVENÍ PARAMETRŮ POHYBU ROBOTU .....	25
9. ZÁVĚR .....	25
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	26
PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY: .....	26
ABSTRAKT .....	27



# ÚVOD

Jedním z aspektů vývoje PRaM je zdokonalování řízení jejich pohybu. Může se týkat mnoha parametrů: dosažení maximální průměrné rychlosti, optimálního tvaru dráhy, minimálního času potřebného k dosažení cílového bodu, odstranění rázů při spouštění pohonů, optimální změny zrychlení v čase, úspor energie při pohybu popřípadě kombinace uvedených parametrů.

Cílem této práce je studie vlivu parametrů pohybu na spotřebu energie se zaměřením na nalezení optimální rychlosti pohybu, ověření vlivu zrychlení během pohybu a porovnání vlivu plynulého nárůstu rychlosti a zrychlení při dosahování cílového bodu TCP. Cíl, metodiku a přínos práce pro průmyslovou praxi stanovují úvodní kapitoly 1 a 2. V následujících dvou kapitolách je popsán současný stav problematiky programování robotů a jsou vytvořeny matematické modely ukazující vliv parametrů pohybu na spotřebu energie. Postup experimentálního ověřování matematických modelů, popis pracoviště, metody programování, měření a postup hodnocení výsledků jsou uvedeny v kapitolách 5 až 7. Výsledky experimentálního ověření a z nich vyplývající doporučení jsou zpracovány v závěrečných kapitolách 8 a 9. Kapitola 10 obsahuje doporučení pro výrobce robotů na rozšíření softwarové nabídky. V přílohách lze nahlédnout do příkladů programů, výstupů z měřicího zařízení, tabulek a grafů, které jsou kompletně zadokumentovány na přiloženém CD disku.

## 1. CÍL A METODIKA DIZERTAČNÍ PRÁCE

### 1.1. CÍL PRÁCE

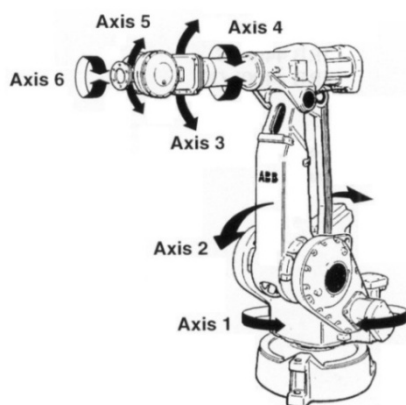
Cíl práce spočívá v návrhu rychlé a jednoduché metody nastavení parametrů pohybu průmyslových robotů za účelem jejich optimálního energetického využití.

### 1.2. METODIKA ŘEŠENÍ

Metodicky spočívá řešení v posouzení současného stavu možností programování pohybu robotu a ve vytvoření a experimentálním ověření matematického modelu vlivu parametrů pohybu – tj. vlivu rychlosti, zrychlení, změny zrychlení v čase a jejich plynulého průběhu na spotřebu energie. Pro simulaci plynulých změn lze použít programování dráhy po částech, přičemž je nutné ověřit délku přírůstku dráhy, kterou lze takto programovat, aby nedošlo k zahlcení řídicí jednotky robotu a robot byl schopen v reálném čase naprogramovanou dráhu včetně dosažení požadované rychlosti skutečně vykonat. Doporučení pro praxi vyplývající ze závěrů práce by se měla týkat jak samotného programování robotů zaměřeného na uživatele, tak návrhů na doplnění programové nabídky ze strany výrobců robotů.

## 2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

### 2.1. PRŮMYSLOVÉ ROBOTY

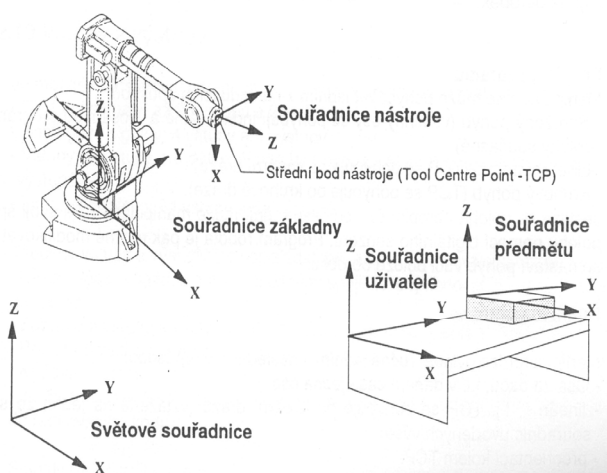


Obr.1 Uspořádání jednotlivých os robotu IRB 4400/60

Průmyslové roboty používají při řízení pohybu koncového efektoru většinou tři až šest os, které na sebe navazují. Když pomineme mobilní roboty, tvoří první tři osy stacionárního robotu polohovací ústrojí, jehož úkolem je dosáhnout určitý bod v pracovním prostoru robotu. Vychází se přitom z různých souřadnicových soustav (pravoúhlá, polární, kulová, antropomorfní) v závislosti na stavbě robotu.

Servopohony jsou vybavené zpětnou polohovou a rychlostní vazbou, která umožňuje dosáhnout cílový bod bez překmitnutí s nulovou rychlostí. Polohová vazba začíná působit v zadané vzdálenosti před dosažením cílového bodu a zamezuje překmitnutí nástroje na konci dráhy. Vyrovnávání polohy a orientace objektu předávaného mezi manipulátorem a výrobním strojem může být zajišťováno kompenzátozem, který umožní současné držení manipulovaného předmětu výstupní hlavicí robotu a např. sklíčidlem stroje.

Souřadnicová soustava PRaM vychází z tzv. světových souřadnic, které definují



referenční bod na podlaze. Počátek souřadnicové soustavy základny je v podstatě nulovým bodem celého robotu, tato základna je umístěna na úrovni montážní plochy. K nulovému bodu robotu se vztahují transformace polohy koncového bodu efektoru i umístění všech ostatních souřadnicových soustav. Souřadnice uživatele určují polohu upínacího zařízení nebo manipulační palety vzhledem

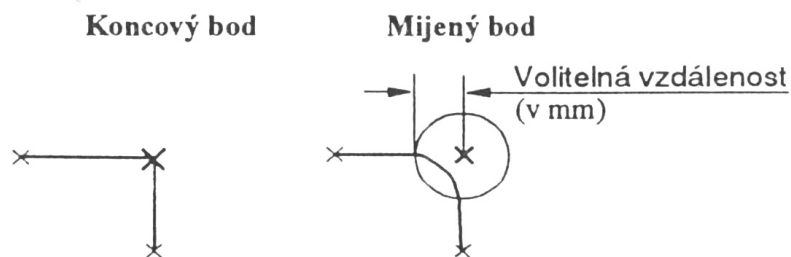
Obr. 6 Souřadnicová soustava robotu

k souřadnicím základny. Polohu obrobku v upínacím zařízení specifikují souřadnice předmětu. Souřadnice nástroje určují TCP - střední bod nástroje (označovaný také jako nulový bod nástroje). Je to střed otáčení nástroje, který vykonává dráhu zadanou technologickým programem.

## 2.2. PROGRAMOVÁNÍ ROBOTŮ

Pro řízení robotů nebyla zatím vytvořena norma syntaxe technologického jazyka, většina výrobců průmyslových robotů používá k programování robotů vlastní technologický jazyk.

Roboty se programují volbou instrukcí a parametrů, které poskytuje hlavní programová nabídka. Programování probíhá buď intuitivně v ručním režimu navedením nástroje do požadovaného bodu v prostoru a uložení této pozice do paměti, nebo lze programovat pomocí souřadnic v prostoru vzhledem ke zvolené souřadnicové soustavě. Při programování dráhy se dále volí nástroj, druh a rychlost pohybu, přesnost dosažení cílového bodu, čekací aj. instrukce. Program se ukládá jako textový soubor, může proto být upravovaný s použitím PC.



Obr.3 Volba způsobu dosažení cílové polohy

Pozice pro pohybové instrukce lze volit i odkazem na polohu definovanou již dříve. Cílovou polohu lze určit z hlediska přesnosti pohybu buď jako koncový nebo jako míjený bod. V případě koncového bodu dosáhne robot programovanou polohu přesně. V míjeném bodu manipulátor nezastavuje, ale mine ho ve volitelné vzdálenosti, čímž se zkrátí technologický čas. Rychlost pohybu se nastavuje v mm/s.

Výrobci robotů používají tři typy technologického programování dráhy:

- Dráha lineární - MoveL – používaná jako pracovní posuv pro technologické účely, např. pro montáž. Nemusí to být vzhledem k uspořádání kinematických dvojic nejnázve proveditelný pohyb.
- Dráha kruhová - MoveC – používá se k natáčení nástroje a jako pracovní posuv obdobným způsobem jako MoveL.
- Dráha odpovídající kombinacím kinematických dvojic - MoveJ - tvar dráhy není přesně definovaný, je to nejjednodušší a nejrychleji proveditelný pohyb určený k dosažení zvolené polohy. Tvar dráhy závisí na konfiguraci robotu. Např. pro robot s polohovacím ústrojím typu RRR budou všechny pohyby prováděné tímto typem pohybu vždy po kružnici.



Programování probíhá pomocí tzv. programových rutin. To znamená, že z instrukcí, které jsou k dispozici v hlavní programové nabídce, lze sestavovat rutinní programy, které působí jako nové instrukce a které lze zařadit do výběrového seznamu instrukcí.

Při programování pomocí technologických programovacích jazyků se vychází z funkcí a instrukcí uvedených v hlavní programové nabídce, která je sice široká, ale přesto nedává možnost řešit některé aspekty pohybu, např. zadání energeticky úsporného pohybu popř. vyžádání informace o energetické spotřebě navrhovaného pohybu.

### 3. VLIV PARAMETRŮ POHYBU NA SPOTŘEBU ENERGIE

#### 3.1. ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY

Při pohybu robotu nastávají energetické ztráty – vlivem rázů při náhlých změnách rychlosti, vlivem odporových sil prostředí, v ložiskách, vlivem tepelných ztrát ve vinutí motoru apod. Je nutné proto zavést určitá zjednodušení. Následující výpočet se zaměří na práci spotřebovanou na manipulaci s předmětem, kterým robot pohybuje nad podložkou:

- břemenem je pohybováno po zadané lineární dráze rovnoměrným přímočarým popřípadě rovnoměrně zrychleným/zpomaleným pohybem
- břemeno je nesené vzduchem, nad podložkou
- nezohledňujeme tedy síly tření
- zohledňujeme odporovou sílu prostředí  $F_o = \frac{1}{2}CS\rho v^2 = Kv^2$
- počítáme s příkonem řídicí jednotky robotu, který je konstantní  $P = UI$
- ostatní vlivy zanedbáváme včetně energie spotřebované na pohyb jednotlivými částmi robotu – výpočet by to příliš zkomplikovalo, existuje velké množství konfigurací robotů

#### 3.2. ROVNOMĚRNÝ PŘÍMOČARÝ POHYB

Zjišťujeme průběh funkce spotřeby energie přímočarého rovnoměrného pohybu v závislosti na čase a hledáme lokální extrém.

Celková spotřeba energie je součtem:

- energie potřebné na přemístění břemene
- energie potřebné k napájení řídicí jednotky
- energie potřebné k překonání odporu prostředí

$$dW = Fvdt + UI dt + F_o vdt$$

Výchozí rovnice, kde celková spotřebovaná energie je součtem energie potřebné na manipulaci s břemenem, energie potřebné pro napájení agregátu a energie potřebné k překonání odporu prostředí.

$$F_o = \frac{1}{2}CS\rho v^2 = Kv^2$$

Síla odporu prostředí odvozená z Bernoulliho rovnice, kde je pro daný tvar a velikost tělesa a dané prostředí pro zjednodušení výpočtu zavedena konstanta K

$$v = konst$$

Pro rovnoměrný přímočarý pohyb je rychlost konstantní

$$W = \int_{t_0}^t Fv dt + \int_{t_0}^t U l dt + \int_{t_0}^t K v^3 dt$$

$$t_0=0, v_{t_0}=0, W_{t_0}=0 \rightarrow C=0$$

Pohyb začíná nulovou rychlostí, počáteční spotřebovaná energie je nulová

$$W = Fvt + U l t + K v^3 t$$

$$v = \frac{s}{t}, U l = P$$

$$W = Fvt + Pt + K \frac{s^3}{t^3} t$$

$$F=ma, a=0 \rightarrow F=0$$

Pro přímočarý rovnoměrný pohyb je zrychlení nulové, proto na spotřebu energie mají vliv pouze poslední dva členy – napájení agregátu a síla nutná k překonání odporové síly prostředí

$$W = Pt + K \frac{s^3}{t^2}$$

U této funkce hledáme optimální dobu pohybu z hlediska energie, proto nejprve položíme první derivaci podle času rovnou nule, najdeme bod lokálního extrému a dosadíme jeho hodnotu do druhé derivace funkce. Kladná popř. záporná hodnota výsledku ukazuje na lokální minimum popř. maximum.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (Pt + Ks^3 t^{-2}) = 0$$

$$P + Ks^3 (-2t^{-3}) = 0$$

$$P - 2Ks^3 t^{-3} = 0$$

$$t^{-3} = \frac{P}{2Ks^3}$$

$$t = s \sqrt[3]{\frac{2K}{P}} \quad \text{zde se nachází extrém funkce}$$

Vytvoříme druhou derivaci funkce [1] podle času a dosadíme za proměnnou t:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t^2} (Pt + K \frac{s^3}{t^2}) = \frac{\partial}{\partial t} (P - 2Ks^3 t^{-3})$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = -2Ks^3 (-3t^{-4}) = 6Ks^3 t^{-4} > 0 \quad \text{jde o lokální minimum}$$

Protože také  $t = s \sqrt[3]{\frac{2K}{P}} > 0$

Pro rovnici spotřeby energie ve tvaru  $dW = Fvdt + Uldt + F_0vdt$

která byla upravena na tvar  $W = Pt + K \frac{s^3}{t^2}$

tedy platí, že jde o funkci, kde existuje lokální minimum spotřebované energie v závislosti vzhledem k době pohybu.

### 3.3 ROVNOMĚRNĚ ZRYCHLENÝ POHYB

Obdobný výpočet provedeme pro rovnoměrně zrychlený pohyb, zjednodušující předpoklady jsou stejné, jako u rovnoměrného přímočarého pohybu:

$$dW = Fvdt + Uldt + F_0vdt$$

$$F_o = \frac{1}{2} CS \rho v^2 = Kv^2$$

$$W = \int_{t_0}^t Fvdt + \int_{t_0}^t Uldt + \int_{t_0}^t Kv^3 dt$$

$$v = f(t) \quad v = at, \quad a = \text{konst}$$

Pro rovnoměrně zrychlený pohyb je zrychlení konstantní, což ze stejného důvodu platí i pro sílu F

$$W = \int_{t_0}^t Fatdt + \int_{t_0}^t Uldt + \int_{t_0}^t Ka^3 t^3 dt$$

$$W = Fa \frac{t^2}{2} + Ult + Ka^3 \frac{t^4}{4} + C$$

$$t_0 = 0, \quad v_{t_0} = 0, \quad W_{t_0} = 0 \rightarrow C = 0$$

$$F = ma, \quad P = UI$$

$$W = ma^2 \frac{t^2}{2} + Pt + Ka^3 \frac{t^4}{4}$$

Rovnice odvozená pro spotřebu energie robotu při manipulaci břemenem pro rovnoměrně zrychlený pohyb.

U této funkce hledáme optimální dobu pohybu z hlediska energie, proto nejprve položíme první derivaci podle času rovnou nule, najdeme bod lokálního extrému a dosadíme jeho hodnotu do druhé derivace funkce. Kladná popř. záporná hodnota výsledku ukazuje na lokální minimum popř. maximum.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( ma^2 \frac{t^2}{2} + Pt + Ka^3 \frac{t^4}{4} \right) = 0$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{ma^2}{2} 2t + P + \frac{Ka^3}{4} 4t^3 = 0$$

$$Ka^3 t^3 + ma^2 t + P = 0$$

Tato funkce má jako řešení dva imaginární kořeny, které neuvažujeme, a jeden reálný kořen – řešeno v programu Mathematica5:

$$t \rightarrow - \frac{\left(\frac{2}{3}\right)^{1/3} ma^2}{\left(-9 Ka^6 P + \sqrt{3} \sqrt{4 Ka^9 ma^6 + 27 Ka^{12}}\right)^{1/3} + \left(-9 Ka^6 P + \sqrt{3} \sqrt{4 Ka^9 ma^6 + 27 Ka^{12}}\right)^{2/3} + 3}$$

Rovnice odvozená pro spotřebu energie robotu při manipulaci břemenem pro rovnoměrně zrychlený pohyb ve tvaru

$$W = ma^2 \frac{t^2}{2} + Pt + Ka^3 \frac{t^4}{4}$$

Má tedy lokální extrém, z něhož zjistíme, zda se jedná o lokální minimum, nebo maximum dosazením hodnoty  $t$  do druhé derivace funkce:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( ma^2 \frac{t^2}{2} + Pt + Ka^3 \frac{t^4}{4} \right) = \frac{\partial}{\partial t} ( ma^2 t + P + Ka^3 t^3 )$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = ma^2 + Ka^3 t^2 > 0$$

protože oba členy nerovnosti jsou větší než 0:

$$ma^2 > 0 \quad Ka^3 t^2 > 0 \quad K = \frac{1}{2} CS \rho > 0$$

$$a^3 > 0 \quad \text{pro zrychlený pohyb} \quad t^2 > 0$$

Není tedy nutné do vztahu  $\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = ma^2 + Ka^3 t^2$  dosazovat hodnotu vypočítanou programem Mathematica5 za předpokladu, že tento reálný kořen nabývá pro všechna  $P$ ,  $K$ ,  $m$ ,  $a$  kladnou hodnotu.

Pro rovnoměrný přímočarý pohyb existuje pro zadanou dráhu optimální doba pohybu, při které se spotřebuje minimální množství energie, to znamená, že existuje optimální rychlost tohoto typu pohybu.

Pro rovnoměrně zrychlený pohyb existuje pro zadanou dráhu také optimální doba pohybu, při které se spotřebuje minimální množství energie, to znamená, že existuje optimální zrychlení tohoto typu pohybu.

## 4. POPIS PRACOVIŠTĚ

### 4.4. ROBOT IRB4400/60



K měření spotřeby elektrické energie byl použit robot IRB4400/60, který se nachází ve výzkumné laboratoři Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky VUT Brno.

Byl instalován v rámci projektu č.6 „Automatická manipulace v technologických pracovištích a ve výrobních systémech (robotizace a výrobní logistika)“ Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii při ČVUT v Praze s cílem vývoje a odzkoušení různých způsobů mezioperační manipulace a montáže. Provádí mezioperační manipulaci s obrobky na modelovém pracovišti, jehož součástí jsou soustruh SPM 16 CNC a frézka PORTOS, s možností přemísťování hotových obrobků na palety mobilního robotu VUTBOT 2.

Robot IRB4400/60

Robot IBR 4400/60 je vybaven elektrickými servopohony a, jeho polohovací ústrojí tvoří tři rotační kinematické dvojice vymezující antropomorfní pracovní prostor, který je rozšířený použitím pojezdové dráhy. Orientační ústrojí sestává ze tří rotačních kinematických dvojic, k dispozici je tedy šest řízených os. Robot je vybaven absolutním odměřováním, pracovní rozsah os 1 až 3 je limitován mechanickými nárazkami, pohyb os 4 – 6 je omezen softwarovými koncovými spínači. Součástí robotu je řídicí jednotka s operačním panelem, disketovou jednotkou a přenosným ovladačem k ručnímu ovládání i programování robotu.

Základní parametry robotu IBR 4400/60:

Rozměry základu/ hmotnost

920 x 640 mm / 980 kg

Maximální zatížení/dosah 5.osy vertikálně

60 kg / 2 140 mm

Max. rychlost TCP / Max. zrychlení TCP

2,2 ms<sup>-1</sup> / 12 – 14 ms<sup>-2</sup>

Rozsah natáčení os 1/2/3	330°/165°/125°
Opakovaná přesnost sledování dráhy při 1 m/s	0,3 – 0,4 mm
Opakovaná přesnost polohování	0,07 – 0,1 mm

Výměna nástrojů je modulární a umožňuje dodávku tlakového vzduchu a elektrických signálů do nástroje pomocí natáčeací příruby se sběrným kroužkem, která se montuje na upínací plochu ramene šesté osy. Výměna nástrojů probíhá na paletě umístěné v pracovním prostoru robotu voláním příslušné programové rutiny.

#### 4.5. MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Spotřeba elektrické energie byla zjišťována pomocí digitálního wattmetru Yokogawa WT1600S. Jde o čtyřkanálový wattmetr, který umožňuje měřit napětí, proud, výkon a spotřebu elektrické energie na základě integrace okamžitých hodnot měřených s vysokou frekvencí. Výsledky měření byly získávány s periodou 200ms. První tři kanály byly využity k měření příkonu a



Digitální wattmetr WT 1600 S

energie, čtvrtý kanál byl použit jako voltmetr pro výstupní signál vyvedený z propojovací desky pro I/O signály řídicí jednotky. Výstupní signál byl nastavován na logickou 1 nebo 0 pomocí programového příkazu, který byl pod názvem Mereni\_On deklarován v I/O signálech pomocí operačního panelu. Po nastavení příkazu Mereni\_On vzrostla hodnota napětí tohoto výstupního signálu na 24 V jako signál ke spuštění měření. Schéma propojení robotu s digitálním wattmetrem je vidět na schématu obr. Měřená data analogového vstupu jsou pomocí A/D převodníku přenášena ve formě digitálního signálu do CPU wattmetru, kde byly změřené hodnoty přepočítány a výstup zobrazen ve formátu .csv, Seznam a význam označení jednotlivých parametrů je uveden v příloze.

Během měření byla zjišťována teplota motoru infračerveným bezkontaktním teploměrem IR60 8A, který pracuje v rozsahu 0-400°C s přesností 2%. Měření teploty motoru bylo z technických důvodů prováděno pouze na víku nejvíce zatíženého pohonu, zjištěné hodnoty sloužily k ověření, zda je motor ohřátý na pracovní teplotu a zda je tato teplota

stabilizovaná. Vliv teploty motoru na spotřebu energie je vyhodnocen v kapitole 8.1 Pracovní teplota měření. Teplota víka motoru byla pro měření důležitou informací, protože při různé pracovní teplotě by výsledky měření nebyly srovnatelné. Bylo nutné předpokládat, že teplo vyvinuté vinutím se na víku projeví s určitým zpožděním. Proto jsme nechali pracovní teplotu vždy ustálit.

Teplota okolí pak byla zjišťována digitálním teploměrem typu LM-81HT a je uváděna informativně. Měla vliv na odvádění odpadního tepla, ale nebyla nijak vyhodnocována. Většina měření proběhla během prázdninových měsíců, kdy se teploty v dílně pohybovaly kolem 25-27°C.

## 5. PROGRAMOVÁNÍ DRÁHY TCP

Pro účely porovnávání spotřebované energie byla stanovena následující omezení – dráha TCP byla naprogramována na 500 a 1000 mm, bez zátěže a se zátěží 5-10-15-20 kg. Ověřování optimální rychlosti bylo provedeno v ose y a výsledek ověřen při pohybu v ose x, ostatní měření – optimální zrychlení, jerk a porovnání plynulého zrychlení pouze v ose x, aby bylo možné výsledky lépe porovnávat.

Při programování byl použit programovací jazyk RAPID firmy ABB, který poskytuje rozsáhlé možnosti programování instrukcí a funkcí, např. typů pohybu, nastavování vstupních a výstupních signálů, testování, sledování dráhy, podmíněného čekání atd. Při programování za účelem této práce byly použity např. funkce:

AccSet – limituje velikost zrychlení a rampu zrychlení – jerk – jako procentuální override maximální dosažitelné hodnoty. První číselná hodnota nastavuje velikost zrychlení, druhá velikost jerku. Instrukce:

AccSet 50, 100; nastavuje velikost zrychlení na 50%, jerk ponechává v maximální dosažitelné hodnotě.

Obě funkce se používají proto, že TPC se vždy pohybuje s maximálním možným zrychlením odpovídajícím zatížení a programované změně rychlosti a v některých situacích to nemusí být vhodné.

Při propočtu rychlosti byla nejprve pro rovnoměrně zrychlený pohyb vypočítána rychlost v každém bodu programované dráhy pomocí vztahu  $v = \sqrt{2as}$ , dráha i rychlost byly zadány tabulkově, takže nebylo nutné každý bod propočítávat zvlášť. Kurzorem se výpočet zopakoval vždy pro celý sloupec.

Při stanovení plynulého nárůstu rychlosti byla velikost rychlosti vypočítané pro rovnoměrně zrychlený pohyb znásobena funkcí  $v_1 = \sin^2 v$ . Tato funkce má na počátku

dráhy obdobný plynulý náběh, jako funkce vypočítaná pomocí polynomu. Poté byla porovnána maximální dosažená takto dosažená rychlost a výsledná rychlost byla upravena koeficientem  $v_2 = v \text{ cílová} / v_1 \text{ celém sloupci}$ , opět kurzorem byl celý výpočet zopakován pro celý sloupec.

PathAccLim – Path Acceleration Limitation - umožňuje redukovat velikost zrychlení popř. zpomalení. Nejprve se nastaví logická hodnota funkce na TRUE, poté velikost zrychlení / zpomalení.

```
PathAccLim TRUE \ AccMax := ..., True \ DecelMax := ....;
```

Tato funkce byla použita při ověřování velikosti zrychlení, které by připadalo v úvahu pro měření vlivu plynulého pohybu na spotřebu energie.

Výrobce udává v návodech, že robot pracuje vždy s maximálním možným zrychlením vyplývajícím z naprogramovaného pohybu. Při programování dráhy s plynulým nárůstem rychlosti bylo nutné omezit zrychlení tak, aby z jeho limitní hodnoty bylo možné vycházet jako z nastavené velikosti tohoto zrychlení. Vyhodnocení takto zjištěného zrychlení je v příloze, zde je příklad použití příkazu v programové rutině.

```
PathAccLim TRUE\AccMax:=6, TRUE\DecelMax:=6;
```

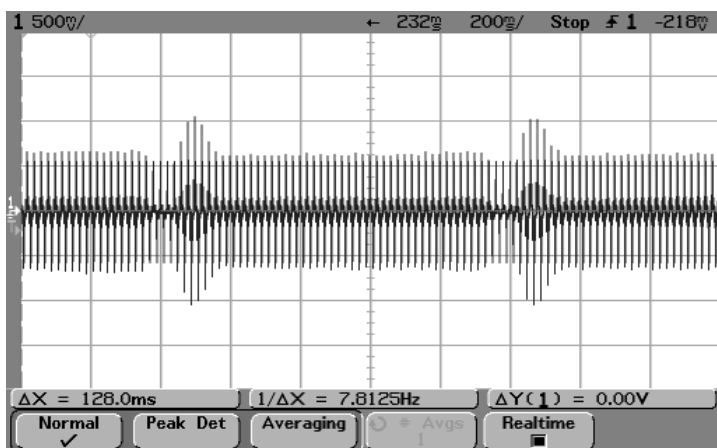
Naprogramovaný pohyb nebyl zcela plynulý, bylo nutné dráhu programovat po 50 mm, protože kratší úseky než 50 mm nebyl řídicí systém schopen v reálném čase zpracovat a pohyb se navíc viditelně zpomaloval. Rychlost a zrychlení byly voleny tak, aby byla dráha dostatečně dlouhá, protože při nutnosti programovat po 50 mm by na krátké dráze bylo málo bodů – málo rychlostí pro porovnání. Byly zvoleny cílové rychlosti  $v_{2000}$  se zrychlením  $a=5\text{mm/s}^2$  a rychlost  $v_{1200}$  se zrychlením  $a=2\text{mm/s}^2$ .

## 6. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ SPOTŘEBY ENERGIE

### 6.4. PRŮBĚH MĚŘENÍ

Při vlastním měření bylo nutné spustit přibližně současně běh programu a aktivovat měřicí přístroj. Po spuštění programu přesunul vždy robot TCP do výchozího bodu a program nastavil logickou hodnotu výstupního signálu Mereni-On na nulu. Po čekací době 2 sec byl signál Mereni-On nastaven na logickou jedničku. Tím se současně nastaví na logickou jedničku signál UcdE4, čímž se přesně stanoví doba počátku a na konci pohybu doba konce měření spotřeby. Procedura uvedená jako příklad ukazuje, jak bylo signálu Mereni-On použito ve vlastních programech.





Sledování průběhu spotřeby proudu na osciloskopu

Na výstupu osciloskopu je vidět nárůst velikosti elektrického proudu v okamžiku zrychlování pohybu a snížení velikosti proudu během zpomalování. Robot pohyboval TCP se zatížením přímočarým vratným pohybem v ose x vzhledem k souřadnicové soustavě základny. Na konci dráhy musel pohyb zabrzdit, na výstupu z osciloskopu je vidět pokles spotřeby, vzápětí bylo nutné uskutečnit rozjezd, zde je zřejmý nárůst spotřeby. Lineární přímočarý pohyb mezi dvěma cílovými body se vyznačuje konstantní velikostí elektrického proudu.

## 6.5. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Výsledky měření byly získány ve formátu \*.csv a uloženy jako textový soubor \*.txt. Textové soubory byly v programu Excel přetřansformovány do tabulky s využitím oddělovače jednotlivých sloupců a získaný soubor byl upraven a uložen ve formátu \*.xls. Vlivem nastavení digitálního wattmetru byly na výstupu i hodnoty, které nesloužily pro účely vyhodnocování této práce, hledanou spotřebu a čas bylo nutné z výstupního souboru odečíst

Celková spotřeba energie byla odečítána pomocí signálu SigA, pomocí kterého byl zapisován součet energie odebrané ve všech fázích. Celková odebraná energie zapsaná signálem SigA byla stanovována jako rozdíl mezi konečnou a počáteční hodnotou celkové spotřeby během naprogramovaného pohybu. Doba začátku a konce měření byla rozlišitelná pomocí střední hodnoty napětí signálu Udc-E4, který po nastavení výstupního signálu s názvem Mereni\_ON na logickou hodnotu 1 vzrostl na hodnotu 25 V, která odpovídala logické jedničce. Logické nule signálu Mereni\_On odpovídala hodnota 0 V. Při vyhodnocování byl odečítán stav spotřeby energie při poslední minimální a první minimální hodnotě řádově  $10^{-3}$  V.

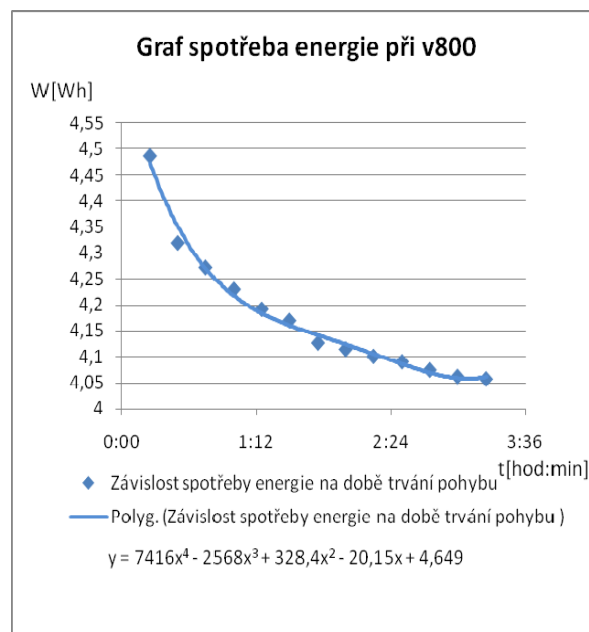
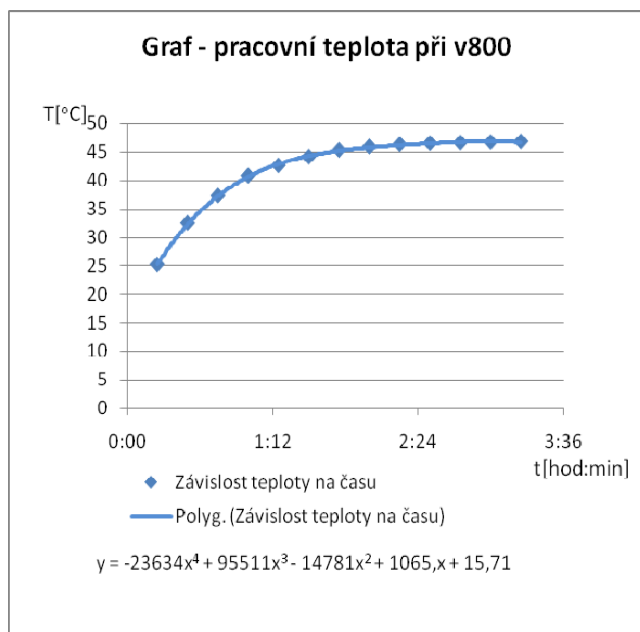
Pro získání každé hodnoty spotřeby energie bylo provedeno 10 měření a pomocí programu Excel bylo provedeno statistické vyhodnocení – aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka a variační koeficient. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příslušných

souborech s názvem mezivýsledky.xls a umístěny jsou přímo v adresáři každé sady měření.

## 7. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNĚ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Tato kapitola dizertační práce je rozsáhlá, jsou zde shrnuty závěry vyhodnocení uvedených v přílohách. Odtud jsou sem zkopírovány grafy, ze kterých je vidět výsledný průběh spotřeb energie. U každého grafu je možné stanovit minimální spotřebu přesněji řešením regresní funkce, vygenerované programem Excel.

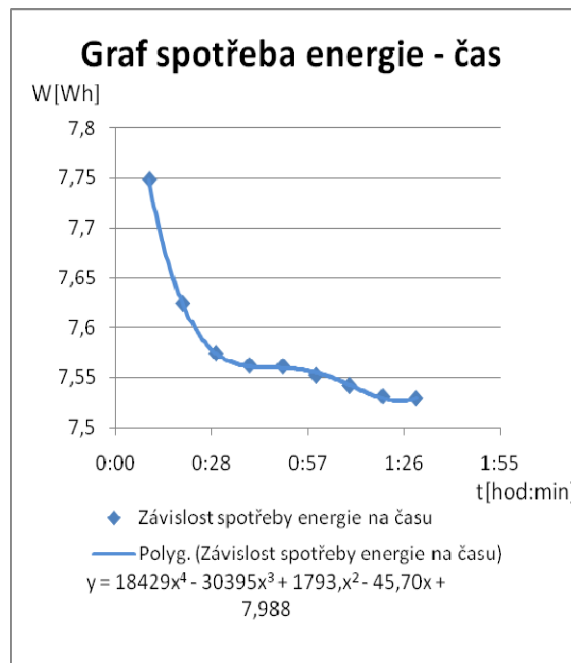
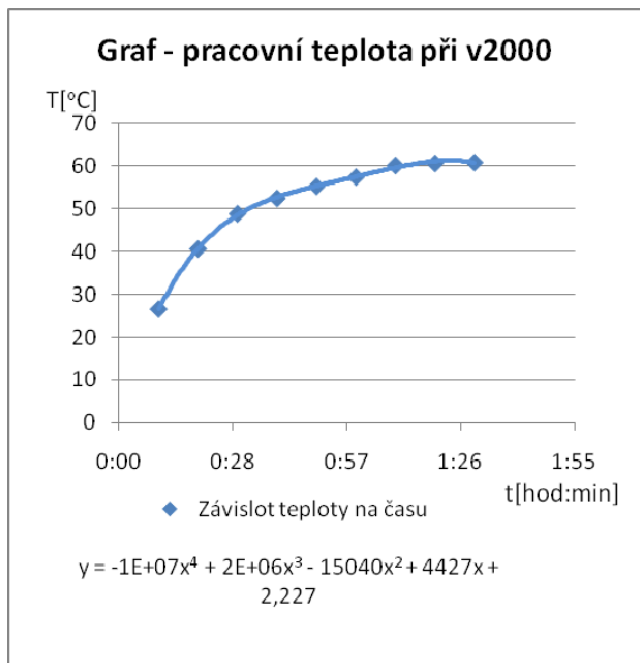
Účelem měření pracovní teploty motoru bylo zjistit, zda a jak dlouho nechat před vlastním měřením zabíhat robot, aby se ustálily teplotní podmínky a zmenšily se tak chyby měření.



Při naprogramované rychlosti v800 se pracovní teplota motoru ustálila na přibližně 47°C, při rychlosti v2000 potom na přibližně 60 °C. Pracovní teplota motoru se pohybovala také v závislosti na délce přestávek v práci, kterou bylo nutné udělat během automatického zapisování naměřených hodnot do paměti měřicího zařízení.

Pracovní teplota se u pohybu se zvolenou rychlostí v800 i v2000 ustálila po jedné až dvou hodinách nepřetržitého pohybu. V praxi ale nebylo možné tak dlouhý záběh pohonu uskutečňovat. Proto byl vytvořen program pro záběh, kde byl zrušen příkaz konce procedury, aby bylo možné v kontinuálním režimu pohybovat ramenem robotu nepřetržitě a kde byly zrušeny čekací doby zavedené do programů měření před sepnutím signálu

Mereni\_On. Poté se robot zabíhal přibližně 30 minut při rychlosti vyšší než pracovní se zatížením 20 kg.

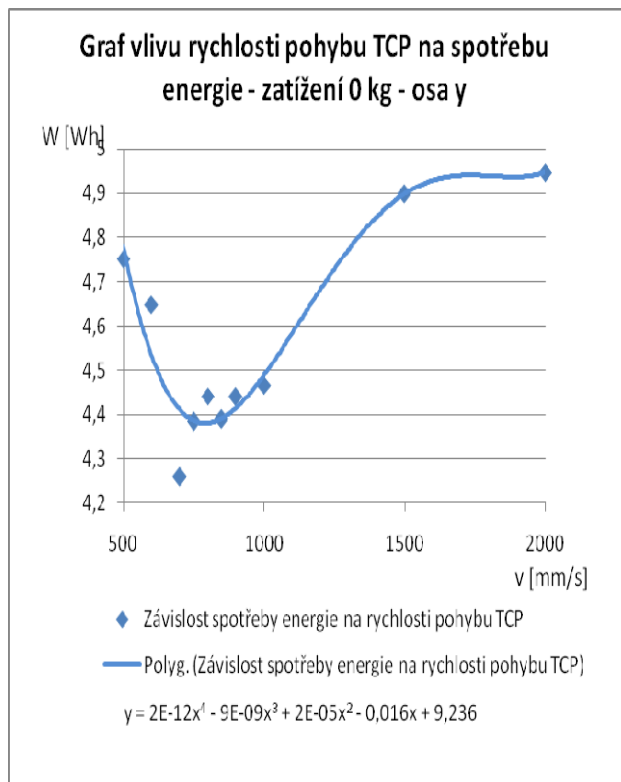


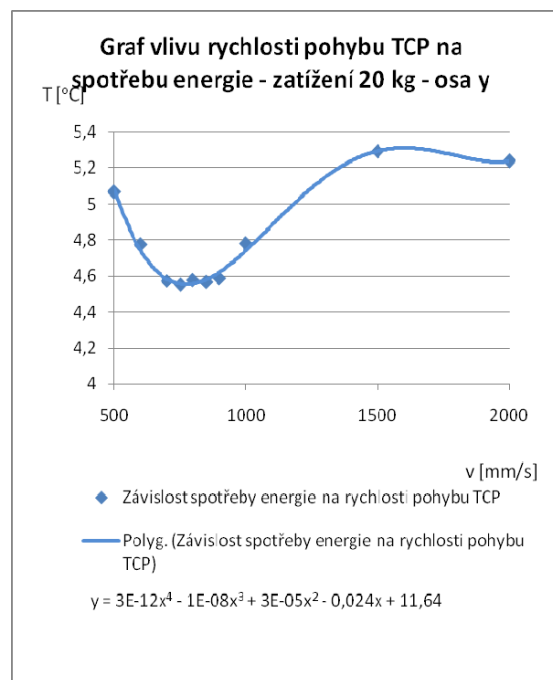
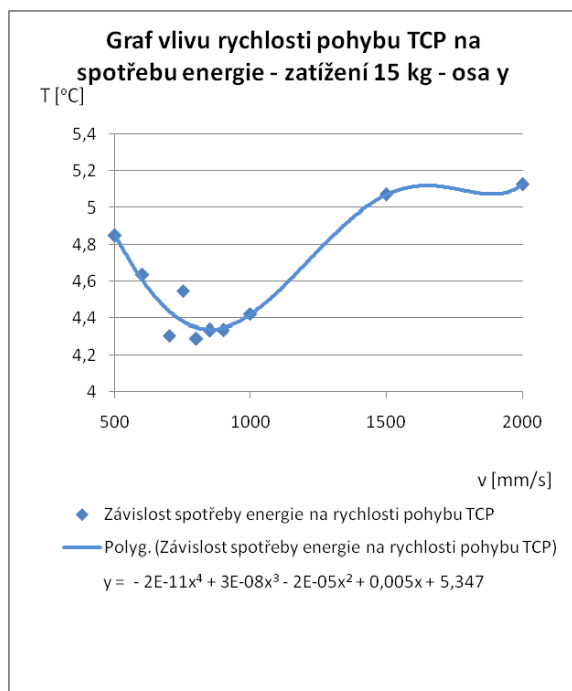
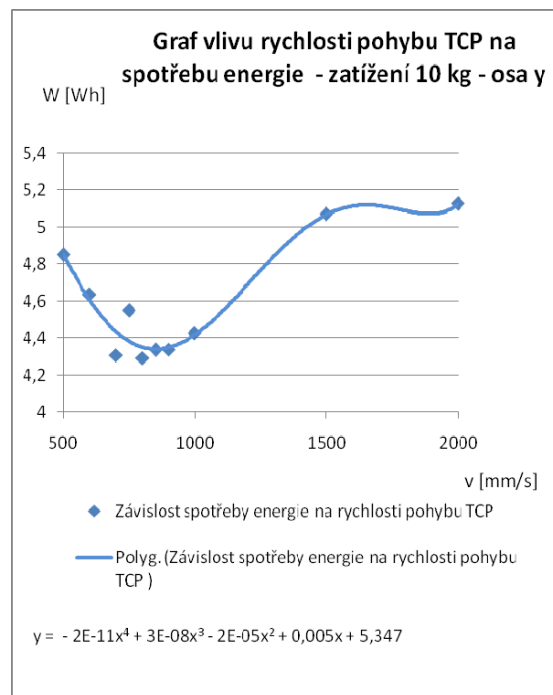
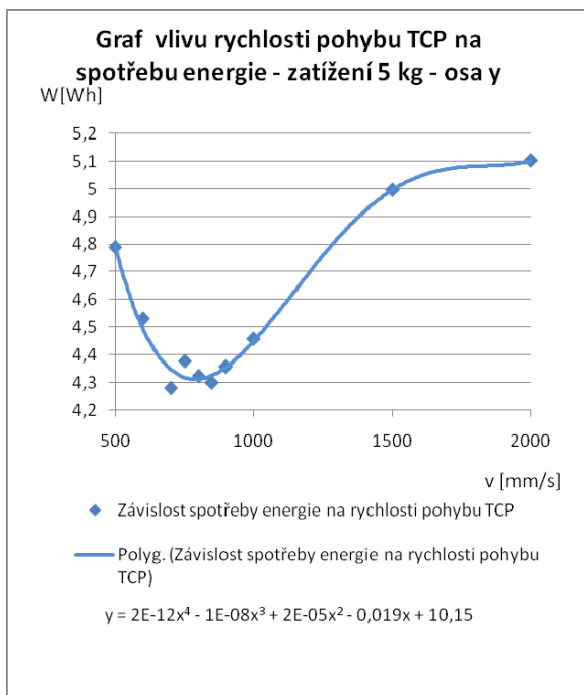
Po dosažení teploty mírně nad očekávanou pracovní teplotou se najelo na cyklus vlastních měření. Teplota víka pohonu přitom zpravidla o něco poklesla, což bylo vyvoláno přestávkami v pohybu, kdy byla data přenášena do měřicího přístroje a na disketu. Mírný pokles teploty víka pohonu znamenal, že se jedná již o stabilní pracovní teplotu a naměřené hodnoty lze zaznamenávat. Změřená data včetně

Při ověřování vlivu rychlosti pohybu na spotřebu energie byla předběžně jednorázově změřena energie při rychlostech

v=100 - 500 -700 -1000 mm/s, bez statistického vyhodnocení výsledků, měření se provedla pouze třikrát, nevyhodnocovala se. Přibližná spotřeba byla odečtena přímo na měřicím přístroji. Takto bylo zjištěno, že optimální hodnoty spotřebované energie pohybují v rozmezí pracovních rychlostí 700 –1000 mm/s. Zde byla provedena podrobnější měření.

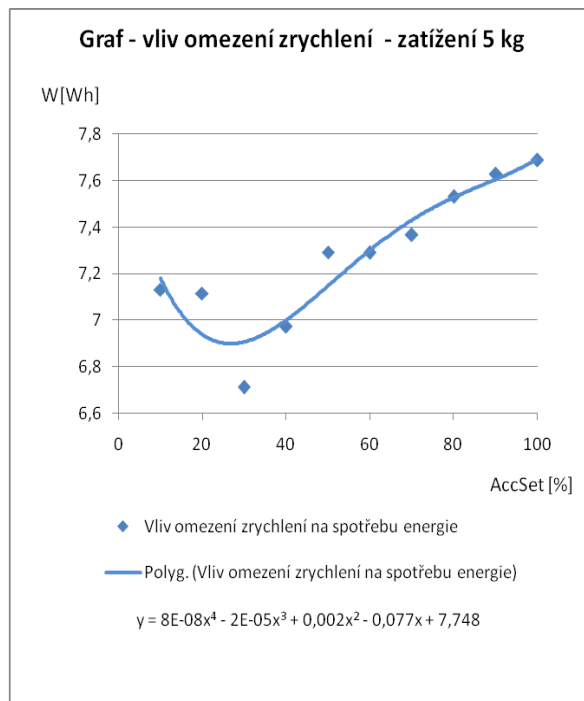
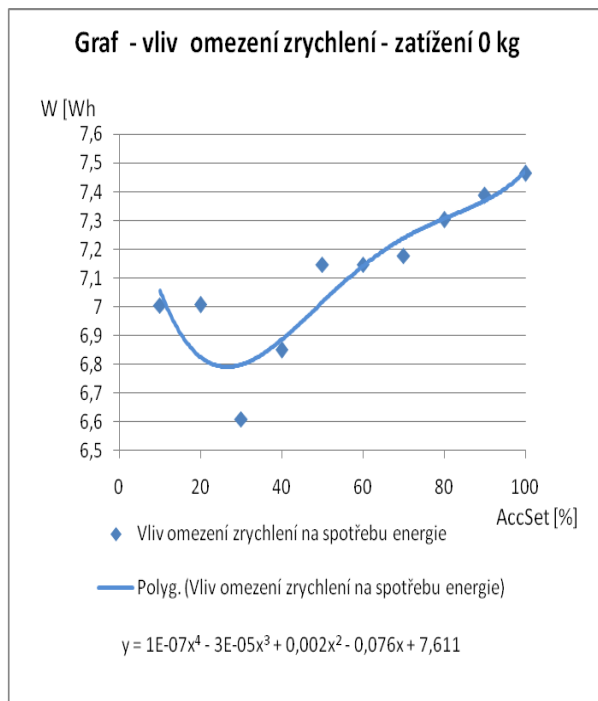
Při prokládání křivky – tzv. spojnice trendu – bylo možné volit typ křivky, nejvhodnější se jeví křivka odpovídající polynomu 4. stupně.



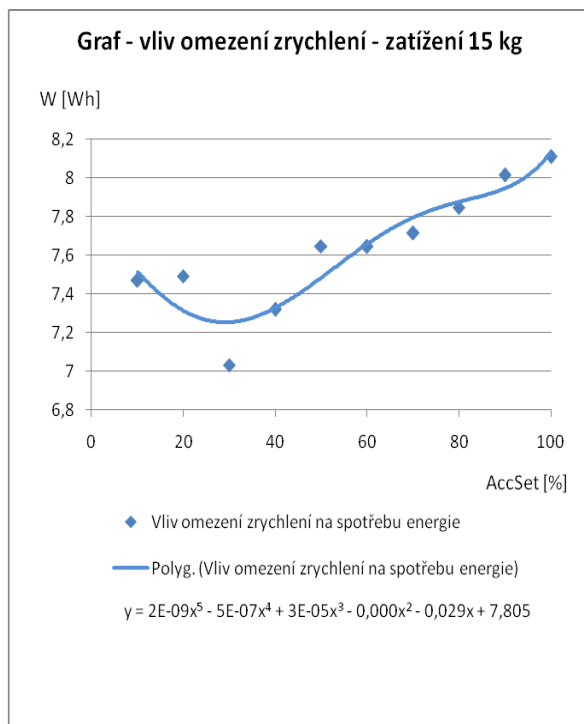
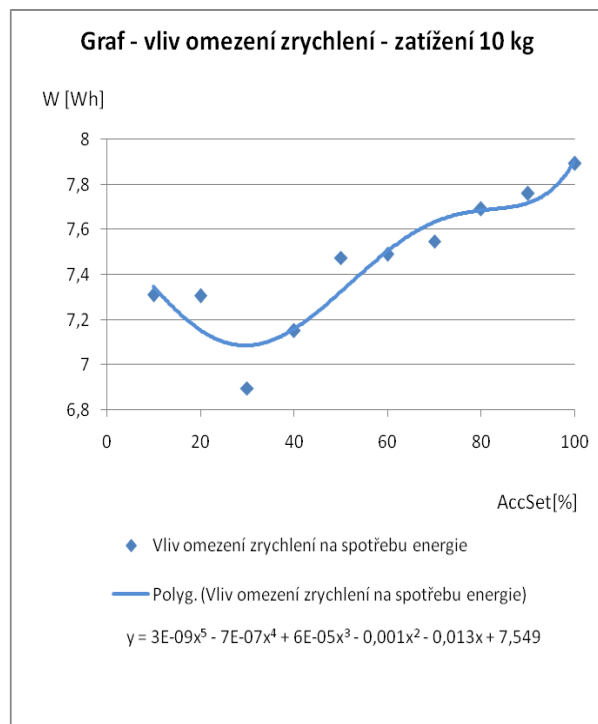


Minimum spotřebované energie se při zatížení 5 kg nachází ve stejné oblasti, jako v předchozím případě. Zatížení neměla na oblast minimální spotřeby energie prakticky žádný vliv.

Robot pracuje při dosahování naprogramované rychlosti s maximálním možným zrychlením vycházejícím ze zadané rychlosti, hmotnosti břemene a výkonu jednotlivých pohonů. Při ověřování vlivu velikosti zrychlení bylo porovnáváním nastaveného omezení maximálního zrychlení ověřováno, zda skutečně existuje optimální omezení zrychlení. Byl zvolen opět přímočarý pohyb v ose x s pracovní rychlostí  $v=2000 \text{ mm/s}^2$  a pomocí funkce AccSet byla spotřeba energie porovnávána při redukci o 10-20-30-40-50-60-70-80-90% maximálního dosažitelného zrychlení.

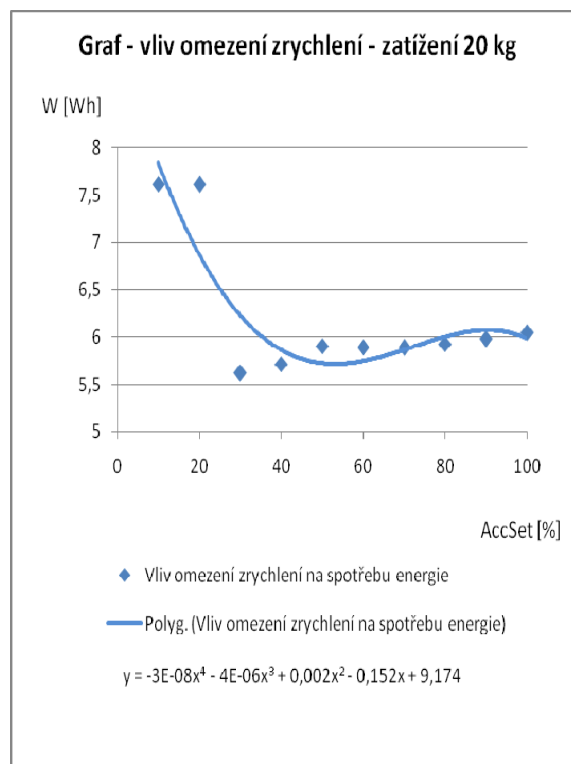


Minimum spotřeby energie se ve všech případech projevilo při  $a=30\%$  maximální dosažitelné hodnoty.

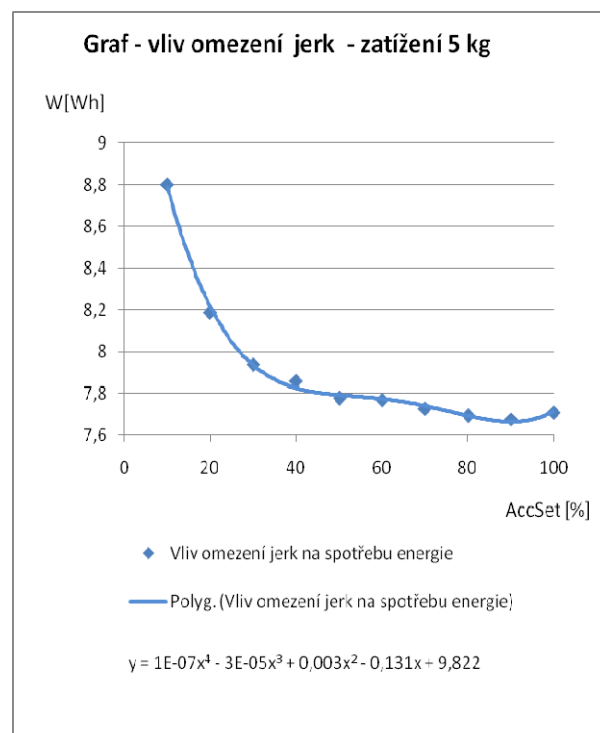
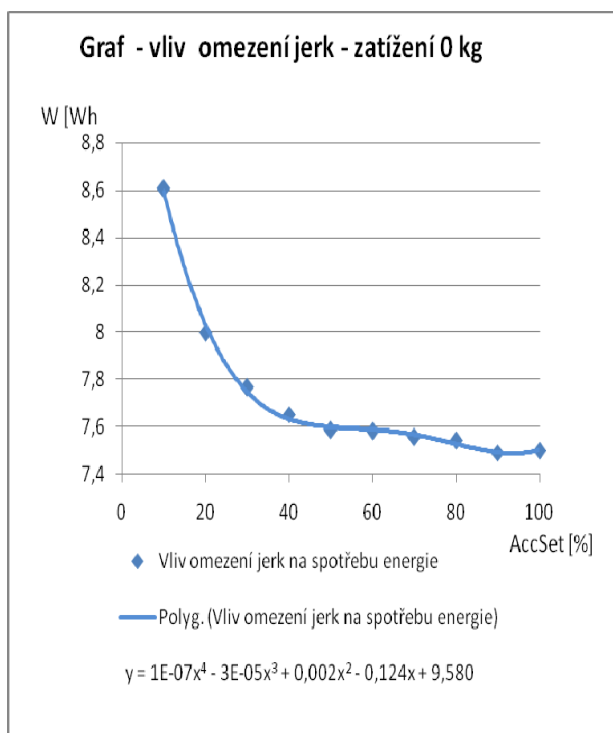


Měřením spotřeby energie při manipulaci robotu bylo prokázáno, že v závislosti na nastavení rychlosti a zrychlení pohybu TCP lze snížit spotřebovanou energii na optimální hodnotu. Tím byl potvrzen teoretický předpoklad existence optimální pracovní rychlosti a optimálního zrychlení jako parametrů pohybu.

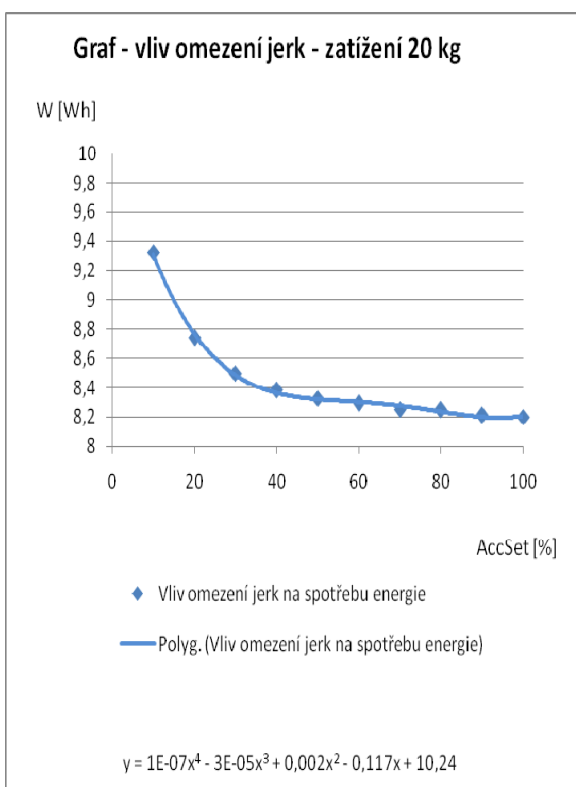
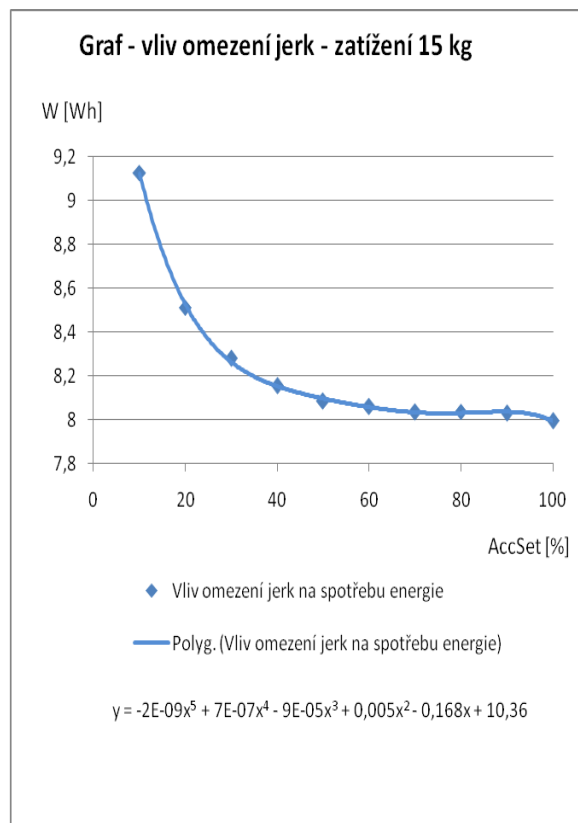
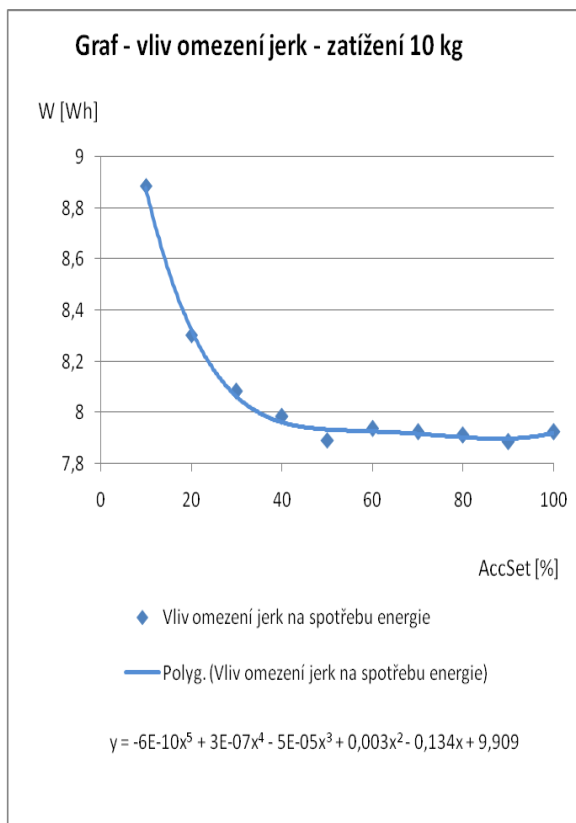
Podobně jako rychlost funguje ve fázi zrychlování pohybu i jerk, to znamená, že robot pracuje vždy s maximální možnou změnou zrychlení v čase, přičemž využívá výkon pohonů při zadané cílové rychlosti a hmotnosti břemene. Při ověřování vlivu jerku bylo porovnáváno nastavené omezení jerku během zvoleného typu pohybu - pro srovnání opět šlo o přímočarý pohyb v ose x s pracovní rychlostí  $v=2000 \text{ mm/s}^2$ .



Nastavení bylo prováděno pomocí funkce AccSet. Spotřeba energie byla porovnávána při redukci o 10-20-30-40-50-60-70-80-90% maximálního dosažitelného jerku.



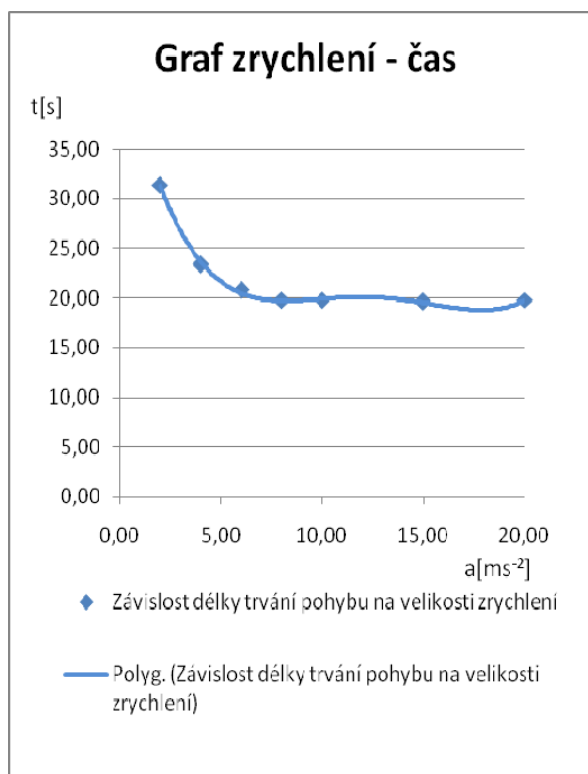
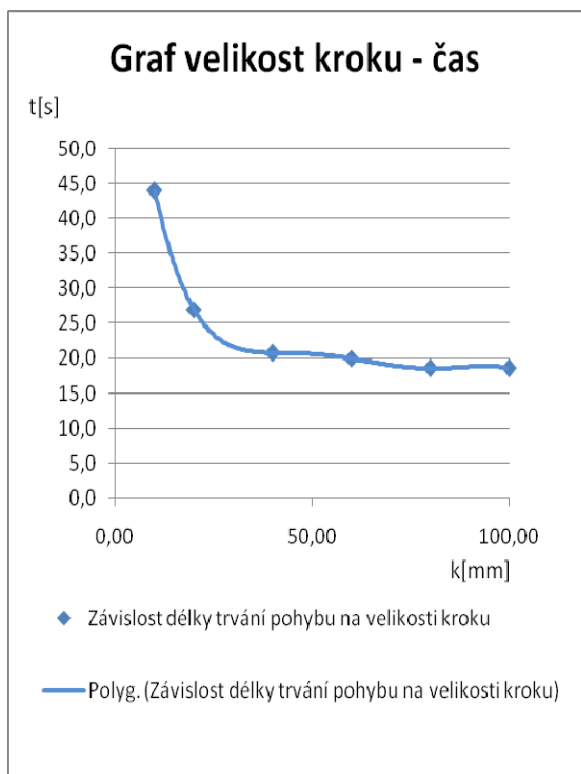
Z obou předchozích průběhů křivek vyplývá, že omezování jerku ke snížení spotřeby nevede. Tuto hodnotu lze omezovat spíše pro zamezení rázům až do přibližně 50% maximální hodnoty, poté nastává výrazný nárůst spotřeby energie.



**Závěr** - z měření vlivu omezení maximálně dosaženého jerku je zřejmé, že omezováním maximální dosažitelné hodnoty se spotřebovaná energie zvyšuje, ovšem výrazně se to projeví až při hodnotách redukce nad 50%.

Před měřením vlivu plynulého průběhu zrychlení na spotřebu energie byla provedena předběžná měření, při kterých se ověřovala velikost programovaného kroku – přírůstků dráhy a velikost vhodného použitého zrychlení.

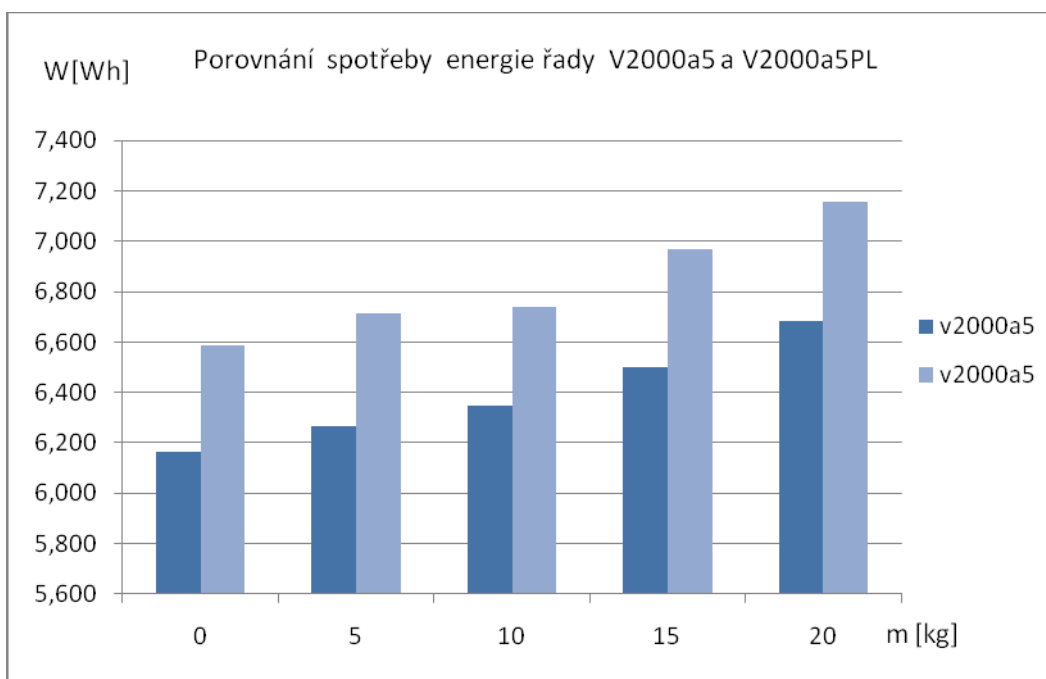
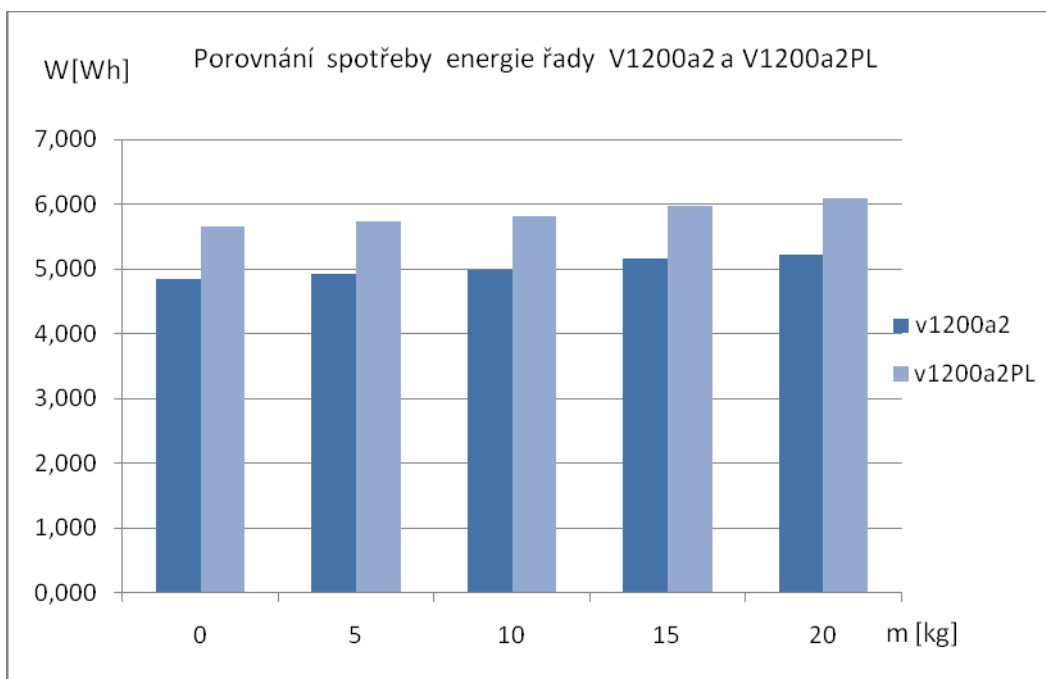
Z grafu je vidět, že při použití přírůstku programované dráhy menšího než 50 mm docházelo k výraznému prodloužení doby pohybu. Při volbě kroku 100 mm se sice doba pohybu ještě snížila, to znamená, že lépe programování bez použití kroku, ale nezachytil se tak plynulý průběh zrychlení, nebo jen velmi hrubě.



Předběžné měření programů s různými hodnotami PathAccLim – v grafu byly označené zjednodušeně jako  $a$  [ms<sup>-2</sup>]. Tato funkce omezuje maximální dosažitelné zrychlení, se kterým se pohybuje TCP. Měření sloužilo k volbě tvaru rampy ve fázi zrychlení / zpomalení pohybu. Z grafu je vidět, že zrychlení  $a = 5 \text{ m/s}^2$  je maximální hodnota, kterou lze použít.

Pro vlastní měření spotřeby energie plynulého průběhu zrychlení v porovnání s konstantním zrychlením byl použit program s pracovní rychlostí  $v2000$  se zrychlením  $a=5\text{mm/s}^2$  a program s rychlostí pohybu  $v1200$  se zrychlením  $a=2\text{mm/s}^2$ .





Z tabulek a grafů vyplývá, že použitím plynulého průběhu zrychlení spotřeba energie výrazně vzroste.

Pro prokázání existence optimálních hodnot parametrů pohybu bylo provedeno poměrně velké množství měření. Pro získání každé hodnoty spotřeby energie bylo provedeno 10 měření a pomocí programu Excel bylo provedeno statistické vyhodnocení – aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka a variační koeficient. Tyto hodnoty

jsou uvedeny v příslušných souborech s názvem mezivýsledky.xls a umístěny jsou přímo v adresáři každé sady měření.

Tato kapitola zahrnuje rozsáhlé soubory měření a jejich vyhodnocování uvedené na příloženém CD. Obsahuje také řadu dalších výsledků, především tabulek s jejich statistickým vyhodnocením.

## **8. NÁVRH METODY NASTAVENÍ PARAMETRŮ POHYBU ROBOTU**

Princip metody nastavení parametrů pohybu:

Pomocí programu sestaveného pro účely manipulace s obrobky se změní orientačně spotřeba energie celého agregátu na vstupu do řídicí jednotky pro několik bodově odstupňovaných rychlostí. Tím se vytipuje oblast, která je z hlediska optimální spotřeby energie zajímavá. Zde se potom provede podrobnější měření.

Navrhovaný postup lze shrnout následovně:

- Sestavení technologického programu
- Deklarace rychlostí pomocí parametrů v hlavičce programu
- Orientační jednorázové proměření spotřeby energie zvolených hodnot rychlostí
- Výběr oblasti s nižší spotřebou
- Podrobnější proměření v této oblasti a vyhodnocení pomocí dostupného počítačového software (např. Excel, Matlab)
- Pro zjištěnou optimální rychlost nastavit obdobně zrychlení

Použití této metody je pochopitelně obtížnější a omezené tehdy, když je třeba koordinovat pohyby více technologických zařízení, je nepoužitelné v případě pokud je přednostním cílem snížit operační čas na minimum bez ohledů na náklady na výrobu.

## **9. ZÁVĚR**

Tato práce vznikla díky projektu č.6 „Automatická manipulace v technologických pracovištích a ve výrobních systémech (robotizace a výrobní logistika)“ Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii při ČVUT v Praze. Cíl práce spočíval v návrhu rychlé a jednoduché metody nastavení parametrů pohybu průmyslových robotů za účelem jejich optimálního energetického využití. Navrhovaná metoda rychlého nastavení optimálních parametrů pohybu robotu vychází z možností programové nabídky robotů, která byla využita také v této práci při hledání optimálních parametrů pohybu.

## 10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ABB ROBOTICS AB: RAPID REFERENCE MANUAL, System Data Types and Routines 3HAC 774-1, for BaseWare OS 4.0, 1999
- [2] ABB ROBOTICS AB: USER'S GUIDE, IRB 4400 Industrial Robot, 3HAC 9299-1, for BaseWare OS 4.0, 1999
- [3] BĚLOHOUBEK,P.- KOLÍBAL,Z.: PRŮMYSLOVÉ ROBOTY IV. - Projektování výrobních systémů s PRaM. Nakladatelství VUT v Brně, CZ, 1993, ISBN 80-214-0532-5
- [4] BĚLOHOUBEK, P.: Matematický aparát pro řízení 6-ti osých robotů, Výzkumná zpráva v rámci HS 180 208, Brno 1999
- [5] EHRENBERGER, Z. – KOLÍBAL,Z.: PRŮMYSLOVÉ ROBOTY III. - Robotické systémy vyšších generací. Nakladatelství VUT Brno, červen 1993. ISBN 80-214-0530-0
- [6] KARPÍŠEK, A.: ANALÝZA A SYNTÉZA ANTROPOMORFNÍHO ROBOTU ALR-1. Diplomová práce - vedoucí Šťastný, J. Katedra automatizace, FS VUT v Brně, Brno 1989.8] ABB
- [7] KOLÍBAL,Z.: PRŮMYSLOVÉ ROBOTY I. - Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM). Ediční středisko VUT Brno, CZ, 1993
- [8] KOLÍBAL, Z. – KADLEC, Z.: PRŮMYSLOVÉ ROBOTY II. - Konstrukce výstupních hlavic a periférií. PC-DIR spol. s r.o. Nakladatelství Brno, září 1993, ISBN 80-0533-3
- [9] KOLÍBAL, Z. – KNOFLÍČEK, R.: MORFOLOGICKÁ ANALÝZA STAVBY PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ, Viena Košice 2000, ISBN 80-88922-27-5, 180 s.

### PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY:

- SMETANOVÁ, A.: Zkušenosti s provozem průmyslového robotu IRB 4400/60 v automatizovaném výrobním systému In: ROBTEP-2004 (Automatizácia / Robotika v teórii a praxi), Vyšné Ružbachy, 21. – 23. 05. 2004, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Košice, Slovak Republic, 2004, s. 415-420, ISBN 80-8073-134-9, CD-rom
- SMETANOVÁ, A.: Experiences with the control system of robot type IRB 4400 at UVSSaR in Brno. In: RAAAD 2004, Brno University of Technology, June 1-6, 2004, p.414-417, ISBN 80-7204-341-2
- SMETANOVÁ, A.: CAM systems and optimization of the end-effector path control of the service robots manipulators. In: Acta mechanica Slovaca, 2-A/2007 Service and Humanoid robotics, Ročník 11, Košice, Slovakia, ISSN 1335-2393 p.131-136
- SMETANOVÁ, A.; KOLÍBAL,Z: Optimization of Energy in Robot Movement, In: Acta mechanica Slovaca, 2-A/2008 Service and Humanoid robotisc, Ročník 12, Košice, Slovakia, ISSN 1335-2393 p. 565-570

## **ABSTRAKT**

Disertační práce popisuje problematiku vlivů parametrů pohybu na spotřebu energie při práci robotu. V úvodní části jsou charakterizovány a hodnoceny základní způsoby programování robotů a pomocí matematických modelů je následně odvozován vliv jednotlivých parametrů na spotřebu energie. Experimentální ověření matematického modelu byla provedena v laboratoři Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Vysokého učení technického v Brně.