

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

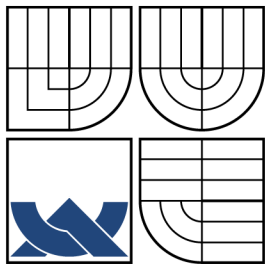
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZSENZOROVÉ ŘÍZENÍ RYCHLOSTI A POLOHY  
STEJNOSMĚRNÉHO KARTÁČOVÉHO MOTORU MALÉHO  
VÝKONU

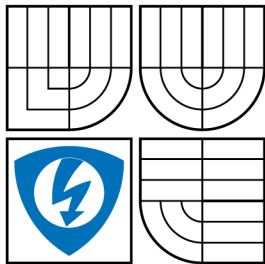
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN SVOBODA



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# BEZSENZOROVÉ ŘÍZENÍ RYCHLOSTI A POLOHY STEJNOSMĚRNÉHO KARTÁČOVÉHO MOTORU MALÉHO VÝKONU

SENSORLESS VELOCITY AND POSITION CONTROL OF LOW LOAD BRUSHED  
DC MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

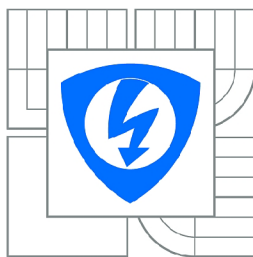
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN SVOBODA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV PRAJZNER

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Teleinformatika

**Student:** Jan Svoboda

**ID:** 125648

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Bezsenzorové řízení rychlosti a polohy stejnosměrného kartáčového motoru  
malého výkonu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s různými typy stejnosměrných kartáčových motorů malých výkonů na malé napětí a s běžnými způsoby jejich řízení. Navrhněte systém pro řízení polohy a rychlosti otáčení a ověřte, že pracuje spolehlivě za všech podmínek. Uvažte vliv napájecího napětí (velikost, rušení, zvlnění po usměrnění ze střídavého zdroje) a vliv opotřebení komutátoru.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Bubser, Holger Untersuchung von Auswertungsmethoden für die Positionsbestimmung in Ventilantrieben mit einem Gleichstrommotor, Diplomarbeit, Fachhochschule Heilbronn, 2000
- [2] Interní dokumentace firmy Honeywell - katalogové listy a specifikace
- [3] Mabuchi Motor, <http://www.mabuchi-motor.co.jp/>

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 31.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Václav Prajzner

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Práce se zabývá bezsenzorovým řízením stejnosměrných kartáčových motorů malého výkonu, používaných v aktuátorech firmy Honeywell. V úvodu seznamuje s řízením stejnosměrných motorů a s používanými metodami snímání jejich rychlosti a polohy. Zvolenou bezsenzorovou metodou je zde metoda detekce komutačních pulzů v signálu proudu motoru. Tyto pulzy vznikají při přeskokování kartáčů mezi lamelami komutátoru. Správným vyhodnocením komutačních pulzů lze získat informaci o rychlosti otáčení a poloze motoru. Práce zkoumá tuto poměrně novou metodu detekce komutačních pulzů. Na naměřených vzorcích signálu demonstruje problémy, které vznikají při jejím použití a dále navrhuje vhodná řešení číslicového zpracování signálu s komutačními pulzy. Spolehlivost navržených metod zpracování signálu je testována na sadě naměřených signálů za různých podmínek, následně je z navrhovaných vybrána nejlepší metoda zpracování signálu, kterou by mohl používat systém bezsenzorového řízení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Stejnsměrný kartáčový motor, řízení motoru, bezsenzorové řízení, H-můstek, detekce, detekce pulzů, Honeywell, aktuátor, komutace, komutační pulzy, zpracování signálu, tvarování signálu, korelační analýza, autokorelace, spektrální analýza

## ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on sensorless control of low load brushed DC motor that is used in the actuators made by the Honeywell company. The first part provides an introduction into motor control and common used methods of speed and position sensing of brushed DC motor. Sensorless method of sensing described in this work is the detection of commutation pulses from the signal of motor current. These pulses are caused by brushes leaping over the commutator bars. Correct evaluation of commutation pulses can provide the information about velocity and position of the motor. This relatively new method of detection of commutation pulses is investigated and arising problems are demonstrated on measured samples of signal. Suitable methods of signal processing are then proposed. Infallibility of these signal processing methods is then proved on the set of signals measured under circumstances of supply voltage and abrasion. Then it is decided which signal processing method that sensorless control system can use is the best.

## KEYWORDS

Brushed DC motor, motor control, sensorless control, H-bridge, detection, detection of pulses, Honeywell, actuator, commutation, commutation pulses, signal processing, signal shaping, correlation analysis, autocorrelation, spectral analysis

SVOBODA, Jan *Bezsenszorové řízení rychlosti a polohy stejnosměrného kartáčového motoru malého výkonu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 56 s. Vedoucí práce byl Ing. Václav Prajzner

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezsenzorové řízení rychlosti a polohy stejnosměrného kartáčového motoru malého výkonu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Václavu Prajznerovi z firmy Honeywell za odborné vedení, poskytnuté zázemí, konzultace a podnětné návrhy.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

Úvod	8
<b>1 Úvod do problematiky řízení</b>	<b>9</b>
1.1 Aktuátory firmy Honeywell . . . . .	9
1.2 Stejnoseměrný kartáčový motor . . . . .	10
1.2.1 Princip stejnosměrného kartáčového motoru . . . . .	10
1.2.2 Stejnoseměrný kartáčový motor malého výkonu . . . . .	11
1.3 Řízení stejnosměrného motoru . . . . .	12
1.3.1 Čtyřkvadrantový tranzistorový pulzní měnič . . . . .	12
1.3.2 Regulační struktura . . . . .	14
1.4 Metody snímání rychlosti a polohy . . . . .	15
1.4.1 Optické senzory . . . . .	16
1.4.2 Magnetické inkrementální senzory . . . . .	17
1.4.3 Detekce komutačních pulzů . . . . .	18
<b>2 Metoda detekce komutačních pulzů</b>	<b>19</b>
2.1 Přehled současného stavu problematiky . . . . .	21
2.1.1 Zpracování signálu s komutačními pulzy . . . . .	21
2.1.2 Příčiny chybného vyhodnocování . . . . .	22
2.1.3 Srovnání signálů s komut. pulzy a z Hallova senzoru . . . . .	23
2.2 Měření vzorků signálu . . . . .	24
<b>3 Popis navrhovaných metod zpracování signálu a jejich simulace</b>	<b>26</b>
3.0.1 Simulace zpracování signálu . . . . .	26
3.0.2 Kompenzace vlivu napájecího napětí . . . . .	26
3.0.3 Diference signálu . . . . .	27
3.1 Tvarování signálu . . . . .	29
3.2 Korelační analýza . . . . .	30
3.2.1 Časová analýza autokorelační funkce . . . . .	31
3.2.2 Spektrální analýza autokorelační funkce . . . . .	32
3.3 Spektrální analýza signálu . . . . .	33
3.4 Vyhodnocení signálu z Hallovy sondy . . . . .	33
3.5 Programové řešení simulace . . . . .	34
<b>4 Diskuze výsledků simulace a jejich porovnání</b>	<b>36</b>
4.0.1 Způsob vyhodnocení simulace . . . . .	36
4.1 Vybrané výsledky graficky . . . . .	36
4.2 Tabulkové srovnání výsledků . . . . .	37

4.3	Chybné vyhodnocování signálu a perspektiva do budoucna . . . . .	39
4.3.1	Náročnost hardwarové implementace . . . . .	40
4.3.2	Další problémy při vyhodnocování . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>43</b>
	<b>Literatura</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>46</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>47</b>
<b>A</b>	<b>Grafická reprezentace výsledků</b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Použité přístroje</b>	<b>55</b>
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého CD média</b>	<b>56</b>



# ÚVOD

Stejnoseměrný kartáčový motor patří k nejstarším elektrickým strojům. Jeho princip objevil Michael Faraday už v první polovině 19. století, moderní použitelný motor byl vyroben později. [12]

Nevýhodou takového motoru jsou právě kartáče (komutátory), které se časem opotřebovávají, jsou zdrojem vysokofrekvenčního rušení a motor má nižší účinnost. Přesto je tento typ motoru v automatizaci a servopohonech hojně využíván vzhledem ke své jednoduché konstrukci, levné výrobě a hlavně velmi jednoduché regulaci v porovnání s ostatními typy motorů. Tam, kde nejsou kladeny nároky na stálý provoz motoru, se navíc nevýhoda kartáčů minimalizuje. V automatizaci budov se takové motory malých výkonů používají např. k řízení pohybu klapky ventilace či klimatizace, žaluzií, ventilů topení atd.

V automatizaci a servopohonech se používají různé způsoby pro řízení stejnosměrných kartáčových motorů. Tyto metody budou rozebrány hned po představení aktuátoru SmartAct firmy Honeywell. Na něm byla provedena měření a pro něj byl proveden návrh bezsensorového řízení metodou detekce komutačních pulzů, respektive zpracování signálu pro spolehlivou detekci komutačních pulzů. Systémem (dle zadání) je zde myšlena právě metoda vyhodnocování signálu s komutačními pulzy, která by mohla nahradit zpětnou vazbu z používaných sensorů. Systém regulace jako takový v aktuátorech již existuje.

U metody detekce komutačních pulzů je snímán proud motoru. Signál proudu motoru obsahuje charakteristické pulzy způsobené přeskokováním kartáčů mezi lamelami komutátoru. Správným vyhodnocením těchto pulzů je možné určit rychlost a polohu motoru. Metoda detekce komutačních pulzů je poměrně novou, nepříliš prozkoumanou metodou. V praxi se moc nepoužívá, nebyla zavedena do sériové výroby. Holger Bubser ve své diplomové práci tuto metodu rozpracoval [3], nebyla ovšem firmou Honeywell shledána za dostatečně spolehlivou. Nicméně firma Honeywell se myšlenkou používat tuto metodu stále zabývá, což je i důvodem pro vznik této práce. Tato práce je tedy rozborem dané problematiky a návrhem jejího řešení pomocí číslicového zpracování signálu s komutačními pulzy – navzorkování signálu A/D převodníkem (narozdíl od výše zmíněné práce, jež jako řešení předkládá analogové předzpracování signálu, který do řídicího mikroprocesoru vstupuje již jako číslicový).

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ŘÍZENÍ

Nejprve bude představen aktuátor firmy Honeywell a pak bude rozebráno, jak probíhá principiálně řízení stejnosměrných kartáčových motorů v takových aktuátorech i v jiných aplikacích se stejnosměrnými, kartáčovými motory malého výkonu.

## 1.1 Aktuátory firmy Honeywell

Bylo uznáno za vhodné nejprve představit příklad konkrétní aplikace řízení stejnosměrného kartáčového motoru malého výkonu. Takovým příkladem je aktuátor SmartAct firmy Honeywell - viz obr. 1.1.



Obr. 1.1: Aktuátor SmartAct firmy Honeywell – typ N05010, převzato z [14].

Jedná se o klapkový pohon pro vzduchové klapky, klimatizační jednotky, žaluzie a vzduchotechnické jednotky. Aktuátor obsahuje stejnosměrný kartáčový elektromotor malého výkonu, převodovku a řídicí elektroniku. Vyrábí se pro různá zatížení a z hlediska vstupního řídicího signálu také v různých verzích - viz [14].

Vyobrazený typ N05010 je přímo vázaný klapkový pohon bez vratné pružiny, umožňující *modulační* a *3/2-polohovou* spolehlivou regulaci v aplikacích s klapkami do  $1\text{ m}^2$  – rozsah krouticího momentu  $5\text{ Nm}$ . Aktuátor je napájen  $24\text{ V ss}$  nebo stř. napětí, má příkon  $2\text{ W}$ , rotační zdvih  $95^\circ \pm 3^\circ$  a doba chodu pro  $90^\circ$  je  $90\text{--}110$  vteřin (v závislosti na frekvenci střídavého napájení). Volbu typu regulace umožňuje otočný přepínač vepředu. Při zvolené modulační regulaci je vstupním signálem napětí  $0\text{--}10\text{ V}$  (resp.  $2\text{--}10\text{ V}$ ) a úroveň tohoto napětí je jednoznačně určena požadovaná poloha výstupní hřídele aktuátoru. Při zvolené  $3/2$ -polohové regulaci je

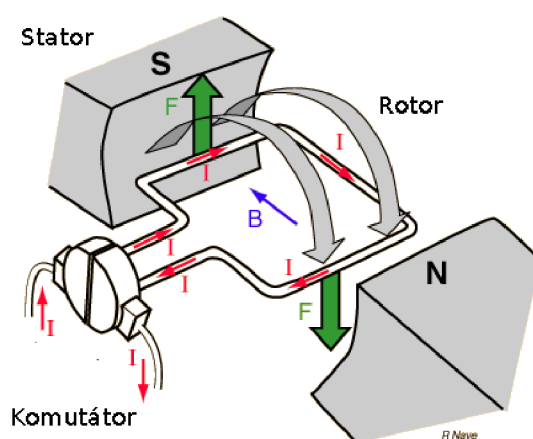
vstupním signálem pouze napájecí napětí, správně přivedené na vstupní svorky aktuátoru. Při 2-polohové regulaci je na jedné svorce stále napětí a aktuátor je v jedné krajní poloze. Jakmile je přivedeno napětí i na druhou svorku, aktuátor se nastaví do druhé krajní polohy. Kdykoli je toto napětí z druhé svorky odpojeno, regulátor se začne nastavovat zpět do první krajní polohy. Podobně při 3-polohové regulaci, ale zde je i třetí stav, kdy aktuátor zůstává ve své poloze při odpojení napětí z obou svorek. Pokud není uživatelem cíleně zapojen bez zpětné vazby, provádí aktuátor vždy po zapnutí kalibraci krajních poloh, i při modulačním režimu regulace (natočí se do jedné, pak do druhé krajní polohy a pak se chová podle přivedených řídicích signálů). Další informace jsou dostupné v katalogovém listu produktu [15].

## 1.2 Stejnosměrný kartáčový motor

Abychom mohli pochopit principy řízení ss. motorů, musíme nejprve pochopit, jak tyto motory fungují.

### 1.2.1 Princip stejnosměrného kartáčového motoru

Motor se skládá z nepohyblivé části – *statoru*, a pohyblivé části – *rotoru*. Stator je nejčastěji tvořen permanentními magnety, rotoru se také říká kotva (pro charakteristický tvar). Na kotvě jsou navinuty cívky (vinutí), které jsou vyvedeny na *komutátor* (rotační přepínač). Kartáče (nejčastěji uhlíkové) se dotýkají komutátoru a tím při točení motoru zajišťují změnu polarity vinutí, takže se motor stále točí. Nejlépe si lze princip představit na elementárním stroji s jedním závitem v rotoru – viz obr. 1.2.



Obr. 1.2: Princip stejnosměrného motoru – převzato z [6]

Uzavřeným obvodem jednoho závitu prochází elektrický proud. Vodič se nachází v magnetickém poli, takže na něj působí síla podle vztahu

$$F = B \cdot I \cdot l, \quad (1.1)$$

kde  $B$  je magnetická indukce,  $I$  je proud protékající vodičem a  $l$  je délka vodiče v magnetickém poli. Směr síly lze určit podle pravidla levé ruky, kde palec ukazuje směr proudu a prsty směr síly. Magnetická indukce  $B$ , proud  $I$ , síla  $F$  i směr otáčení jsou také naznačeny v obr. 1.2.

Stator může být také tvořen elektromagnetem, tedy dalším vinutím. Vinutí statoru a rotoru ss. motorů lze pak zapojit různými způsoby. Podle toho je rozdělujeme na cize buzené, paralelně buzené (derivační), sériově buzené a kompaundní. V servopohonech se však nejčastěji používají ss. motory s permanentními magnety ve statoru, což je i případ této práce. Pro děje ve stejnosměrném motoru platí tyto dvě základní rovnice:

$$U_i = C \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (1.2)$$

$$M = C \cdot \Phi \cdot I. \quad (1.3)$$

První říká, že při otáčení úhlovou rychlostí  $\omega$  se ve vinutí rotoru indukují napětí.  $C$  je konstanta motoru,  $\Phi$  je magnetický tok. Podle druhé rovnice působením magnetického toku a proudu  $I$  vzniká moment síly.

Práci motoru v ustáleném stavu pak popisuje následující rovnice. Ta obsahuje všechny proměnné, kterými by se dala úhlová rychlost motoru řídit – změnou odporu  $R_a$  v obvodu rotoru, změnou mag. toku  $\Phi$  nebo změnou napájecího napětí  $U$ :

$$\omega = \frac{U}{C \cdot \Phi} - \frac{R_a}{(C \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (1.4)$$

Řízení změnou odporu kotvy  $R_a$  se kvůli velkým ztrátám při větších výkonech příliš nepoužívá, ale je možné jej použít při rozběhu motoru. Řízení změnou magnetického toku  $\Phi$  by bylo možné, kdyby stator obsahoval budicí vinutí. Motory, kterými se tato práce zabývá, mají ve statoru permanentní magnety, a tak toto řízení nepřipadá v úvahu. Navíc řízení pomocí předchozích dvou způsobů není možné v celém rozsahu. Změnou napájecího napětí  $U$  ale můžeme dosáhnout plynulé změny rychlosti otáčení motoru v celém rozsahu. Ztráty jsou velmi malé a toto řízení dokonce umožňuje změnit směr otáčení změnou polaritu napětí. Stejnosměrný motor je tak ideálním regulačním motorem, protože jeho otáčky lze plynule měnit změnou přiváděného napětí. [?] [17] [2] [5]

### 1.2.2 Stejnosměrný kartáčový motor malého výkonu

Právě motory s permanentními magnety ve statoru se používají pro nízkovýkonové aplikace, servopohony, modelářství. Kotva (rotor) je obvykle minimálně třípólová,

aby nevznikal problém s mrtvým úhlem motoru. V již zmiňovaném aktuátoru Smart-Act firmy Honeywell jsou používány např. motory od japonské firmy Mabuchi Motor [11], konkrétně motor RK-370CA – viz obr. 1.3



Obr. 1.3: Motor Mabuchi RK-370CA – převzato z [10]

Některé vybrané parametry motoru – typ RK-370CA-081050: Nominální napájecí napětí – 24 V, bez zátěže 3900 ot./min. při proudu 10 mA, při maximální účinnosti 3210 ot./min. při proudu 47 mA. Kroutící moment až 110 g · cm (10,6 mN · m) při proudu 220 mA. Váží asi 50 g, na délku měří 43 mm. Další údaje viz katalog [10].

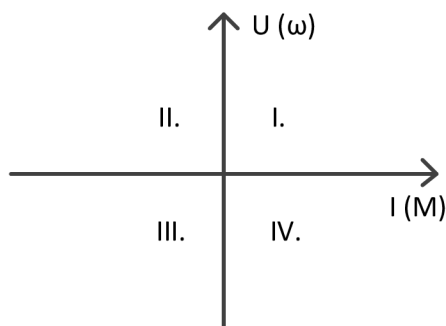
## 1.3 Řízení stejnosměrného motoru

Stejnoseměrný motor lze tedy plynule regulovat změnou napájecího napětí, reaguje na jeho střední hodnotu. Řízení motoru čistě ss. napětím ovšem způsobuje výkonové ztráty. Při malém napětích (malé rychlosti otáček) a velkém momentu (zatížení) by v něm tekly příliš velké proudy. To je náročné na výkonnost, cenu i objem řídicí elektroniky. Je mnohem výhodnější napájet motor pouze jmenovitým napětím, které je ovšem dodáváno opakovaně v pulzech. Tímto způsobem měníme střední hodnotu napájecího napětí – když jsou pulzy krátké, střední hodnota napětí je malá, jsou-li pulzy dlouhé, střední hodnota je velká. Takto se střídou obdélníkového periodického signálu řídí střední hodnota napětí, které napájí motor. Jedná se o *pulzní šířkovou modulaci* (PŠM, PWM – pulse width modulation). [5].

### 1.3.1 Čtyřkvadrantový tranzistorový pulzní měnič

Pro řízení tímto způsobem se používají tranzistory jako spínače – jejich spínáním určíme frekvenci i šířku pulzů dodávaného napětí do motoru. Pro nízkovýkonové aplikace se používají většinou unipolární tranzistory MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor – polem řízený tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič), pro vyšší výkony se používají tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem), nebo tyristory. Jedná se potom o tranzistorový stejnosměrný pulzní měnič.

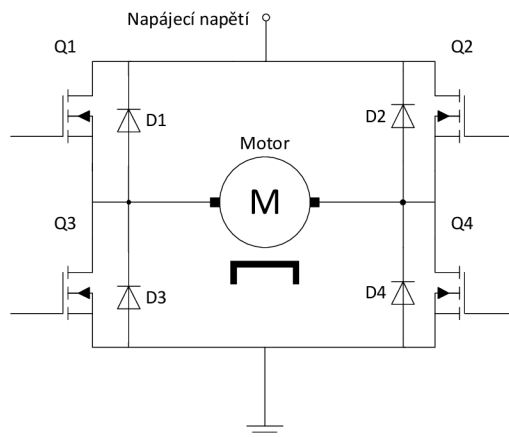
Řízení motoru se dá rozdělit do čtyř pomyslených kvadrantů, viz obr. 1.4. Vodorovná osa vyjadřuje výstupní proud (moment síly), svislá osa výstupní napětí (úhlovou rychlost).



Obr. 1.4: Pracovní oblasti tranzistorového ss. pulzního měniče

Jednokvadrantový měnič (I.) tak dovoluje jen jeden směr proudu a jednu polaritu napětí, u motoru tedy chod jen v jednom směru otáčení. Dvoukvadrantový měnič pracující v I. a IV. kvadrantu dovoluje při jednom směru proudu měnit polaritu napětí, dvoukvadrantový měnič pracující v I. a II. kvadrantu pak dovoluje měnit směr proudu při jediné polaritě napětí. Čtyřkvadrantový měnič dovoluje oba směry proudu při obou polaritách napětí. I. a III. kvadrant potom představují tok energie ze zdroje (měniče) do zátěže (motoru), tedy otáčení motoru na jednu či druhou stranu. II. a IV. kvadrant představuje opačný tok – rekuperaci energie ze zátěže zpět do obvodu měniče (např. při brždění motoru), jinak také generátorický chod. Kvalitní řízení motoru v rychlostní i polohové vazbě je realizovatelné pouze čtyřkvadrantovým pohonem, který umožňuje oba směry otáčení i oba směry momentů v nich, tedy jak akceleraci, tak i brždění.

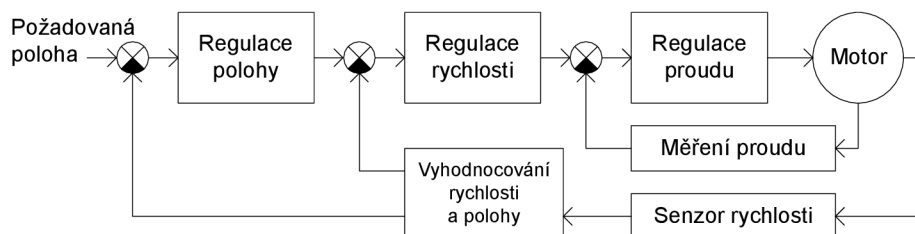
Takovému čtyřkvadrantovému tranzistorovému ss. měniči se také říká *H-můstek* a pro svou četnou používanost se běžně vyrábí jako integrovaný obvod v jednom pouzdře. Příklad H-můstku je na obr. 1.5. Pro motory malého výkonu bývají tranzistory typu MOSFET. Každý tranzistor bývá také překlenut diodou, aby byl umožněn tok proudu v opačném směru, je-li tranzistor zavřen (II. a IV. pracovní kvadrant měniče – rekuperace energie). Chceme-li aby se motor točil jedním směrem, musí být spínány prvky (tranzistory) Q1 a Q4. Budeme-li spínat prvky Q2 a Q3, motor se bude točit opačným směrem. V případě, že teď např. Q3 vypneme, motor bude v generátorickém chodu – proud poteče přes zpětnou diodu u tranzistoru Q1 a bude se vracet zpět přes otevřený tranzistor Q2 zpět do motoru. Takto je možno ovládat pracovní oblast motoru spínáním tranzistorů Q1 až Q4. Tranzistory v takových měničích spínají na frekvencích desítky až stovky kHz. [17] [5]



Obr. 1.5: Příklad čtyřkvadrantového ss. pulzního měniče (H-můstku)

### 1.3.2 Regulační struktura

Do aktuátoru SmartAct vstupuje požadovaná poloha (0–10 V při modulačním režimu), nebo požadovaný směr otáčení (požadovaná krajní poloha) při režimu 3/2-polohovém. Obecné schéma regulace takového aktuátoru je na obr. 1.6. Vstupem je požadovaná poloha, na niž reaguje regulace polohy, jí podřízená regulace rychlosti a proudu. Regulace proudu má nejvyšší prioritu, slouží jako limitace maximálního proudu motorem, zajišťuje zastavení motoru v krajních polohách na mechanických dorazech – proud motorem velmi vzroste. Algoritmus regulace je dnes většinou implementován do mikroprocesoru. Zpětnou vazbu regulátorům zajišťují senzory. Senzor proudu může být realizován Halloovou sondou nebo galvanicky odděleným bočníkem, např. pomocí optočlenu. V aktuátorech SmartAct se měření proudu děje snímáním napětí na odporu malé hodnoty v sérii s motorem. Senzorem rychlosti otáčení (potažmo polohy) může být např. tachodynamo, optický enkodér nebo magnet s Halloovou sondou, používaný právě v aktuátorech SmartAct. Vyhodnocování rychlosti a polohy zastává elektronika v senzoru a mikroprocesor. [17] [4]



Obr. 1.6: Schéma regulace v aktuátorech se ss. motory malého výkonu.

## 1.4 Metody snímání rychlosti a polohy

Jako základní snímání rychlosti a polohy slouží tkzv. *kompenzace podle proudu* (viz regulace proudu v obr. 1.6). Měření proudu slouží nejen pro zjištění krajních poloh aktuátoru (mechanický doraz, proud velmi vzroste), ale i pro kontrolu zátěže a hrubý odhad rychlosti motoru. Pro řízení ovšem potřebujeme rychlost a polohu znát co nejspolehlivěji. Toho se dá dosáhnout různými způsoby. Jenom některé se však používají v nízkovýkonových servopohonech. Obecně se tyto metody dají rozdělit na *senzorové* (pomocí externího měření) a *bezsenzorové* (využívá se přidružených jevů a vlastností motoru), ovšem v obou případech je výstupem informace o otáčkách nebo poloze motoru.

Historicky nejstarší (senzorovou) metodou je pravděpodobně použití *tachodynamy*, což je malý komutátorový motor s permanentními magnety a s výstupním napětím přímo úměrným rychlosti. Je to v podstatě druhý motor spojený s hřídelí poháněného, který ovšem pracuje pouze v generátorickém režimu. Pro použití v nízkovýkonových aktuátorech nepřipadá v úvahu, protože neudává informaci o poloze (resp. získání informace o poloze by bylo náročné), druhý motor by byl drahý a zvětšil by objem aktuátoru. [19]

Další metodou využívající toho, že motor může být i generátorem, je *BEMF* (Back ElectroMotive Force – zpětná elektromotorická síla). Jedná se o stejný princip jako tachodynamo, ovšem tachodynamem je zde poháněný motor sám sobě, metoda je tedy bezsenzorová. Pokud z poháněného motoru pravidelně na krátký okamžik odpojíme napájení a změříme napětí na jeho svorkách, toto generované napětí je úměrné otáčkám motoru. U stejnosměrného motoru se třemi vinutími ve statoru by toto napětí bylo zvlněné úměrně otáčkám. Toto zvlnění by bylo možné snímat a vyhodnocovat, tento způsob však s sebou však přináší další problémy. Jak uvidíme dále, metoda snímání komutačních pulzů je lepší alternativou. [18]

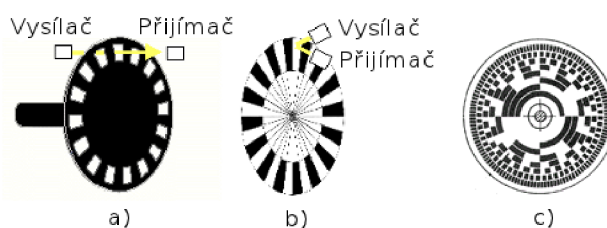
V servopohonech se také používají jako senzory *potenciometry*, je to absolutní polohová zpětná vazba, běžné jsou například v dražších aktuátorech (firma Honeywell v nich tuto metodu používá) nebo v modelářských servomotorech. Nevýhodami jsou cena (aby byla zaručena dostatečná přesnost a živostnost), někdy také obtížná montáž (až za převodovkou – není to zpětná vazba přímo z motoru). Hlavní nevýhodou pro aktuátory SmartAct je ovšem to, že výstupem je poloha, ne rychlost, kterou chceme udržet konstantní. Z toho vyplývá nutnost derivace polohy pro získání rychlosti, což je vzhledem k nízké rychlosti aktuátoru velmi obtížné. [3]

Dále jsou rozebrány dvě nejpoužívanější senzorové metody snímání rychlosti a polohy motoru malého výkonu a také je představena metoda detekce komutačních pulzů.



### 1.4.1 Optické senzory

Optický rotační enkodér (senzor, snímač) je elektromechanický převodník, který převádí rotační pohyb na sekvence elektrických digitálních impulzů. Může mít různou konstrukci, často však obsahuje disk s posloupností opticky průhledných a neprůhledných otvorů, nebo odrazných a neodrazných plošek. Optický vysílač (svítivá dioda) vysílá světlo ve viditelném nebo infračerveném spektru a optický přijímač (fototranzistor, fotodioda) světlo buď přijímá, nebo nepřijímá – podle toho, jak se disk, spojený s hřídelí motoru, otáčí. Na obrázku 1.7 je vidět a) disk s průhlednými otvory a b) disk s odraznými ploškami. Optický přijímač dopadlé světlo převádí na elektrické impulzy a výstupem je potom obdélníkový signál s frekvencí úměrnou otáčkám. Při rovnoměrném rozložení otvorů či plošek pak odpovídá jeden pulz otočení o určitý, vždy stejný počet stupňů. Takový snímač se nazývá *inkrementální* (přírůstkový), k zjištění polohy je třeba pulzy obdélníkového signálu zpracovávat např. čítačem, přičemž známe, kolik pulzů (otvorů, odrazných plošek) znamená jednu otáčku. Inkrementální enkodér obvykle generuje dva obdélníkové průběhy, vzájemně posunuté o  $90^\circ$ , což umožňuje vyhodnocovat i směr otáčení.



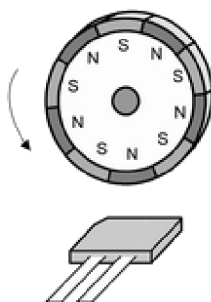
Obr. 1.7: Princip optických enkodérů, a) s průhlednými otvory, b) s odraznými ploškami, c) absolutní optický enkodér. Převzato z [1], [8].

Dalším typem jsou *absolutní* optické enkodéry, jež poskytují informace o přesné poloze natočení hřídele motoru. Princip je stejný, jen drah s odraznými ploškami je více a kombinace odrazných plošek udává jednoznačnou polohu, viz obr. 1.7c. Nevýhodou je nutnost většího počtu optických přijímačů. Pro plošky na disku a tím i pro kódování výstupního signálu se používá standardní binární kódování, nebo Grayovo kódování.

Výhodou optických senzorů je jejich přesnost, lehce zpracovatelný výstup a dlouhá životnost. Nevýhodou je zanášení prachem, což snižuje spolehlivost a vysoká pořizovací cena, což je pro levnou sériovou výrobu překážkou. [19] [8]

## 1.4.2 Magnetické inkrementální senzory

Nejnámějším principem senzorů založených na snímání magnetického pole jsou senzory využívající *Hallova jevu*, které reagují na kolmé magnetické pole. Prostřednictvím Hallova jevu je toto magnetické pole převáděno na slabé kladné či záporné elektrické napětí na svorkách snímacího prvku. Právě takové snímače používá nyní firma Honeywell v aktuátorech SmartAct. Mimo ty ještě existují i senzory využívající dalších principů, např. AMR senzory využívají změnu elektrického odporu prostřednictvím jevu AMR – Anisotropické magnetické resistance. [20]



Obr. 1.8: Princip magnetického inkrementálního senzoru využívající Hallův jev, převzato z [21].

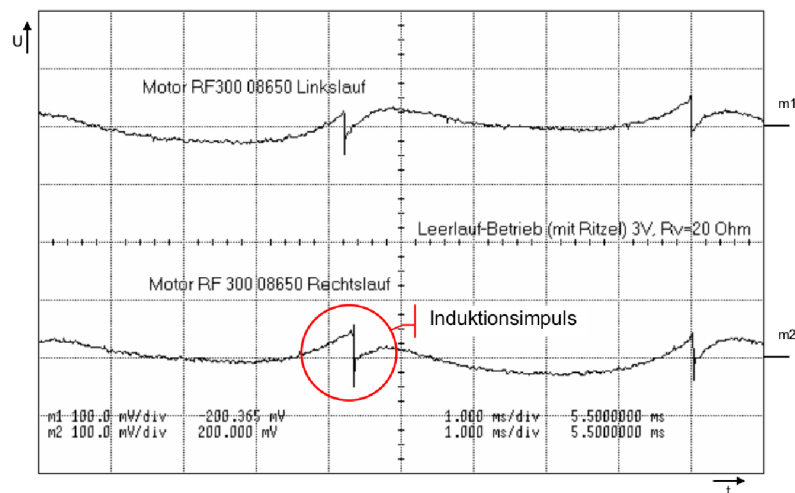
Princip magnetického inkrementálního senzoru s Hallovým prvkem je patrný z obr. 1.8. Magnetický kotouč obsahuje střídavě pólované permanentní magnety. Při jeho otáčení Hallův senzor detekuje změnu magnetického pole, výstupem by byl průběh napětí podobný sinusovému. Hallův senzor v sobě však má ještě vyhodnocovací obvod, který tento průběh převádí na obdélníkový průběh napětí. Počet impulzů na otáčku pak odpovídá počtu pólů na magnetickém kotouči, někdy Hallův senzor obsahuje dva Hallovy prvky vedle sebe a je tak možné určit i směr otáčení, stejným způsobem jako u optických enkodérů (podle toho, který prvek dříve detekuje změnu magnetického pole). Výstupem Hallova prvku bývá typicky stejný obdélníkový signál jako z optických enkodérů, jen s menším počtem pulzů na otáčku (max. několik desítek, omezeno minimální silou magnetického pole pro vybuzení Hallova senzoru). [19] [21]

Výhodou takových senzorů je přesnost a spolehlivost, nevýhodou vysoká cena a v případě aktuátorů SmartAct firmy Honeywell i nevýhodná montáž a poloha senzoru. V aktuátoru je totiž magnetický kotouč připevněn na výstupní hřídel motoru, ještě před převodovkou. Motor je připevněn na druhé straně k desce plošného spoje, stejně jako ostatní součástky. Nešikovné je potom umístění Hallova senzoru, protože je řešeno pomocí další destičky plošného spoje s Hallovým senzorem, přilepené

kolmo na desku plošného spoje s motorem a ostatními součástkami. Takové řešení činí výrobu složitější, což je spolu s cenou celého senzoru důvodem, proč Honeywell uvažuje o jiných způsobech řízení motoru a důvodem zadání této práce.

### 1.4.3 Detekce komutačních pulzů

Jak již bylo řečeno v úvodu, jedná se o metodu, kdy je snímán proud motoru. Ten obsahuje charakteristické pulzy způsobené přeskakováním kartáčů mezi lamelami komutátoru, které jsou následně vyhodnocovány – nesou informaci o otáčkách a při inkrementálním zpracování i o poloze, stejně jako předcházející optické a magnetické senzory. Ukázka takových pulzů pro motor Mabuchi RF-300 je na obr. 1.9, komutační pulz je zde vyznačen. Tvar signálu s komutačními pulzy závisí na konstrukci daného motoru a u některých motorů nejsou komutační pulzy ze signálu patrné.



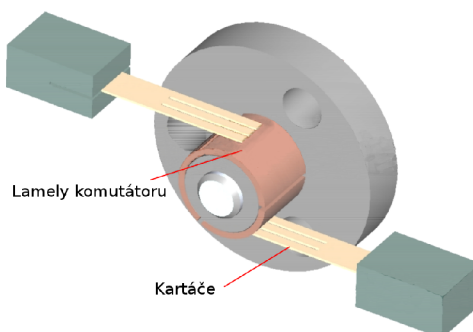
Obr. 1.9: Signál proudu motoru Mabuchi RF300 s vyznačeným komutačním pulzem, převzato z [3].

Tato metoda řízení motoru by byla z finančního hlediska nejvýhodnější a nejjednodušší metodou – není třeba žádného senzoru, jen správné a spolehlivé vyhodnocování signálu, což je záležitostí několika součástek a mikroprocesoru, který již většina aplikací řízení motoru běžně používá. Využil by se tak vedlejší jev komutace – zvlněný signál, který ovšem nese cennou informaci. Nevýhodou je působení různých vlivů, které způsobují chybné vyhodnocování takového signálu.

Holger Bubser má ve své diplomové práci o metodách řízení polohy ss. motoru na str. 26 působivé vyhodnocení těchto metod, do kterého zahrnuje i další metody a posuzuje je podle mnoha různých kritérií. Z tohoto hodnocení metoda detekce komutačních pulzů vychází nejlépe. [3]

## 2 METODA DETEKCE KOMUTAČNÍCH PULZŮ

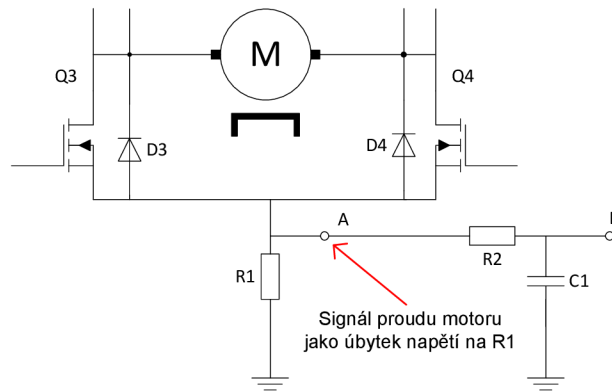
Pro lepší pochopení vzniku komutačních pulzů je na obrázku 2.1 vyobrazena typická konstrukce komutátoru ve stejnosměrných motorech malého výkonu. Kartáče (bývají z uhlíku nebo i z kovu [11]) doléhají na lamely komutátoru a zajišťují tak stálý kontakt s vinutím motoru, změnu polarity vinutí a tím funkci motoru. Motory malých výkonů mají ve statoru typicky tři vinutí, proto i lamely komutátoru jsou tři.



Obr. 2.1: Konstrukce komutátoru v ss. motorech malého výkonu, převzato z [3].

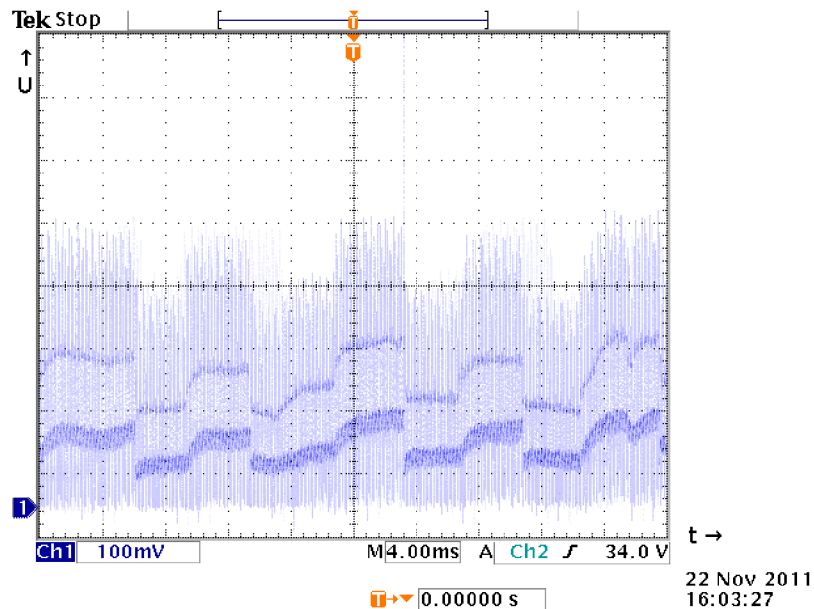
Komutační pulzy v signálu proudu motoru (obr. 1.9) vznikají tak, že při přechodu kartáče z jedné lamely komutátoru na druhou se kartáč dotkne na okamžik obou lamel. Lamely si můžeme představit jako tři svorky, mezi něž jsou zapojena tři vinutí statoru. Vinutí jsou tedy uzavřena do kruhu a komutátor zajišťuje připojování jejich svorek na napájení – otáčení polarity (přepínáním se mění i sérioparalelní kombinace vnitřního zapojení cívek). Když se tedy kartáč dotkne obou lamel, je vinutí mezi těmito lamelami na okamžik zkratováno a jak pohyb pokračuje, hned zase přepólováno do opačného směru proudu. Ve vinutí tak dochází k rychlému zkratu a v zápětí obrácení směru proudu, které se projevuje komutačními pulzy. Velikost těchto pulzů závisí na indukčnosti vinutí a zatížení motoru. [3]

Obr. 2.2 ukazuje, jak se dá snímat signál proudu motoru, obsahující komutační pulzy. Ve skutečnosti není snímám proud, ale úbytek napětí na odporu zařazeném do série s motorem. Proud, který napájí motor, teče z kladné svorky napájení, přes H-můstek, zpět na zápornou svorku napájení (zem). Ještě před uzemněním tedy zařadíme odpor. Odpor bývá malý, řádově desítky ohmů. Toto si můžeme dovolit jen s motory malého výkonu jako v této aplikaci, kdy teče motorem typicky kolem 50 mA. Na odporu se tak neztrácí příliš velký výkon, jeho malá hodnota zajišťuje malý úbytek napětí, přitom jím může téct poměrně velký proud. Tento způsob snímání až za H-můstkem navíc zajišťuje, že bude zachycován kladný signál nezávisle na směru otáčení motoru (polaritě napětí na jeho svorkách).



Obr. 2.2: Snímání signálu proudu motoru s komutačními pulzy a filtrace PWM.

Snímáme-li signál pouze na odporu R1 (na obr. 2.2 svorka A), vypadá jako na následujícím obr. 2.3, protože motor je přes H-můstek spínán pulzní šířkovou modulací (PWM). Komutační pulzy jsou sice patrné (skoky signálu), na signál proudu motoru je ovšem namodulován signál pulzní šířkové modulace (o frekvenci přibližně 7 kHz). Tento je překážkou pro další zpracování. Je možné jej odfiltrovat například dolní propustí – R2, C1 na obr 2.2. Filtrovaný signál je potom dále možné zpracovat různými způsoby, viz další kapitola.

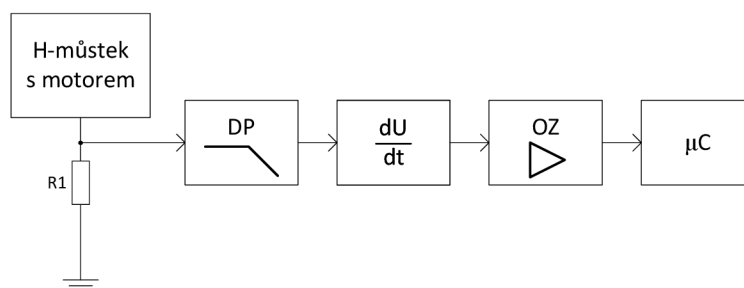


Obr. 2.3: Snímek z osciloskopu – nefiltrovaný signál proudu motoru s namodulovaným signálem pulzní šířkové modulace.

## 2.1 Přehled současného stavu problematiky

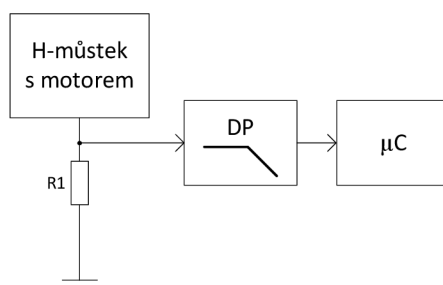
### 2.1.1 Zpracování signálu s komutačními pulzy

Pro zpracování takového signálu, již po filtraci, se nabízí např. derivační článek – horní propust, který by detekoval skoky, rychlé změny v signálu. Mezní frekvence horní propusti musí být ovšem nastavena tak, aby propouštěla všechny signál do ní vstupující – pak bude pracovat jako derivační článek. Takové řešení rozpracoval již Holger Bubser ve své diplomové práci [3] a zabývala se jím i firma Honeywell. Za detekcí pulzů derivačním článkem následuje úprava úrovně signálu operačním zesilovačem, aby úroveň signálu byla použitelná pro vstup do mikroprocesoru (přerušeni). Blokové schéma takového zpracování signálu s komutačními pulzy je na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Blokové schéma vyhodnocování signálu s komutačnímu pulzy.

Dalším řešením by mohlo být pouze odfiltrování pulzní šířkové modulace (PWM) ze signálu s komutačními pulzy a takový signál nadále zpracovávat rovnou mikroprocesorem – upravit případně jeho úroveň a přivést jej na vstup, který umožňuje A/D převod. Číselný signál by byl dále zpracováván vhodným algoritmem v mikroprocesoru, obr. 2.5. Uvážit, zda by bylo takové řešení vhodnější, a navrhnout obecný algoritmus pro zpracování signálu v mikroprocesoru, je cílem této práce do budoucna.

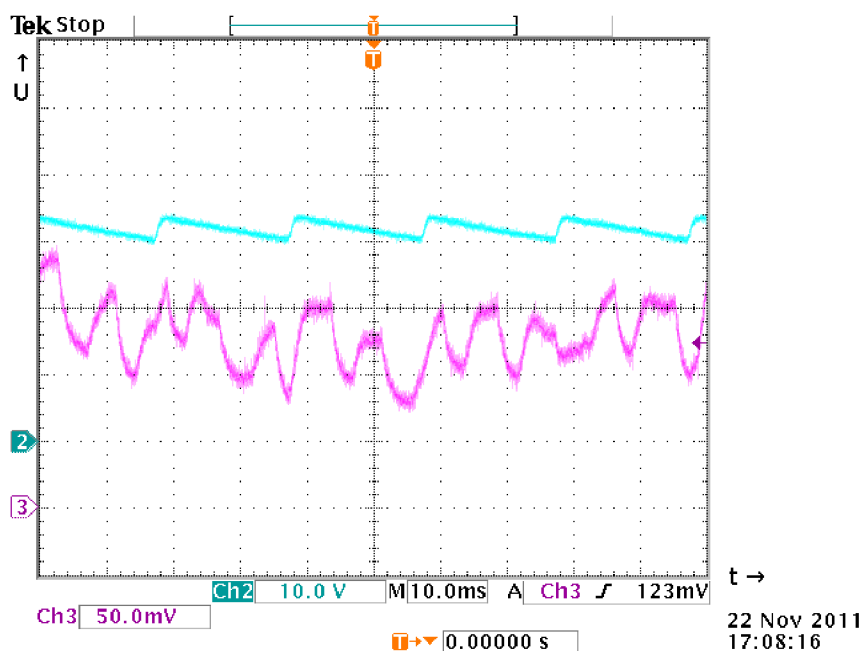


Obr. 2.5: Alternativní zpracování signálu s komutačnímu pulzy.

## 2.1.2 Příčiny chybného vyhodnocování

V Honeywellu byla prováděna již měření spolehlivosti detekce komutačních pulzů vyhodnocovacím obvodem podobným, jaký navrhl Holger Bubser ve své práci (obr. 2.4). Závěr byl takový, že toto vyhodnocování není vždy spolehlivé. Dále budou rozebrány některé známé příčiny (viz také v zadání práce) tohoto chybného vyhodnocování.

*Vliv napájecího napětí* – aktuátory SmartAct mohou být napájeny stejnosměrně, nebo i střídavě, obsahují totiž jednocestný usměrovač. Jednocestně usměrněné napětí, vyhlazené kondenzátorem na výstupu, je vidět na obr. 2.6. Na toto zvlněné napětí je potom superponován signál proudu motoru s komutačními pulzy, který je zobrazen pod signálem jednocestně usměrněného napětí (již vyfiltrován dolní propustí od pulzní šířkové modulace – PWM). Zvlnění napájecího napětí a tím zvlnění signálu s komutačními pulzy potom způsobuje chybnou reakci derivačního článku a na výstupu vyhodnocovacího obvodu jsou pulzy i tam, kde komutační pulzy ve skutečnosti nejsou. To je problém a vyhodnocování pak nefunguje správně. Dalo by se to vyřešit dvoucestným usměrněním, takový obvod by však ještě musel obsahovat galvanické oddělení, protože napájení a řídicí signál aktuátoru používají společný zemnicí vodič. Takové řešení by bylo příliš drahé a komplikované.



Obr. 2.6: Snímek z osciloskopu – zobrazení vyhlazeného, jednocestně usměrněného napětí (kanál 2, azurová) a zvlněného signálu s komutačními pulzy opotřebeného motoru (kanál 3, fialová).

*Vliv opotřebení komutátoru* – dalším problémem je stáří a opotřebení motoru. Obr. 2.6 ukazuje obě vady, vliv napájecího napětí i opotřebení komutátoru. Odmyslíme-li si zvlnění vlivem napájecího napětí, má signál s komutačními pulzy velmi nepravidelný tvar, narozdíl např. od signálu na obr. 1.9, kde jsou komutační pulzy jasně patrné. To je způsobeno právě opotřebením komutátoru. Signál ovšem stále vykazuje určitou periodicitu – po šesti pulzech se opakuje, tvar každého pulzu je specifický a při další otáčce vždy stejný. Na jednu otáčku rotoru se třemi vinutími totiž připadne šest komutačních pulzů, což je patrné z konstrukce komutátoru na obr. 2.1 (vinutí jsou navzájem posunuta tak, že když jeden kartáč přeskakuje mezi dvěma lamelami, druhý je právě v půlce třetí lamely atd.). Tato nepravidelnost signálu z opotřebeného komutátoru pak způsobuje také nepravidelné pulzy na výstupu vyhodnocovacího obvodu – derivační článek reaguje nepravidelně, u každého pulzu jindy podle jeho specifického tvaru, což znemožňuje jednoduché zpracování signálu mikroprocesorem jako v případě pravidelných pulzů přímo úměrných otáčkám.

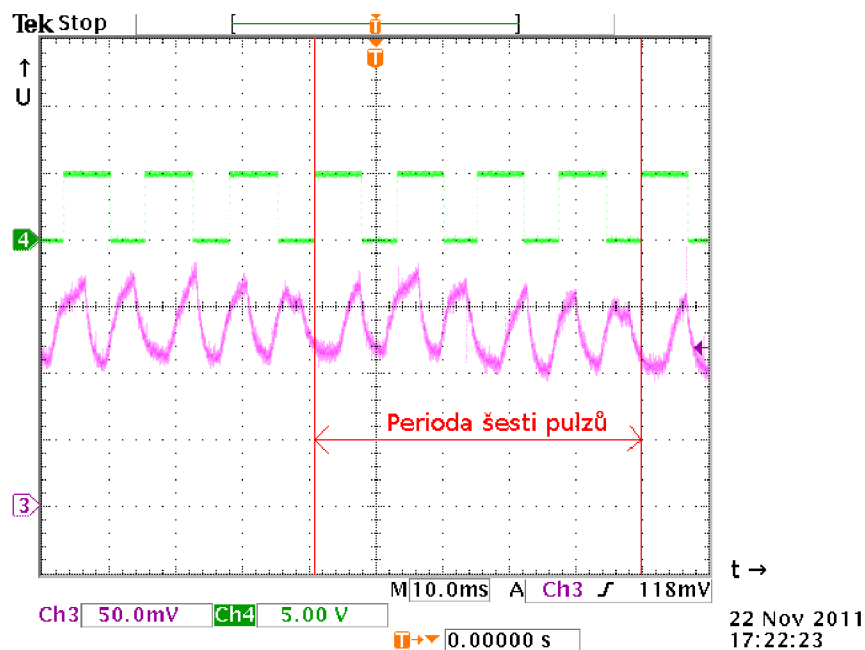
*Vliv zatížení motoru* – není příčinou chybného vyhodnocování. Měření v této práci byla provedena na nezatíženém motoru, kdy se komutační pulzy projevují nejslaběji. Zatížení motoru způsobuje spíše zlepšení signálu s komutačními pulzy co do spolehlivosti zpracování, protože při zatížení motoru se začne ještě více projevovat indukčnost vinutí a komutační pulzy budou ještě patrnější, rozdíl mezi špičkami signálu bude větší [3]. I tento vliv bude proměřen v pokračující práci, neměl by však představovat problém ve zpracování signálu, spíše naopak.

*Klimatické podmínky* – nebyly v rámci této práce uvažovány. Pro provoz aktuátorů SmartAct jsou dle katalogu [15] tyto: Teplota při provozu  $-20$  až  $+60$  °C a relativní vlhkost 5–95 %, nekondenzující.

### 2.1.3 Srovnání signálů s komut. pulzy a z Hallova senzoru

Na následujícím obrázku je ještě srovnání obou signálů – z Hallova senzoru, který je nyní používán v aktuátorech SmartAct a signálu proudu motoru s komutačními pulzy. Tentokrát je aktuátor napájen stejnosměrným napětím, proto signál s komutačními pulzy není tak zvlněný, je ovšem nepravidelný vlivem opotřebení komutátoru. Na obrázku je vyznačena perioda šesti komutačních pulzů, kdy se jejich tvar opakuje. Ze srovnání je vidět, že signál s komutačními pulzy skutečně nese rovnocennou informaci o rychlosti otáčení, otázkou je jen spolehlivé zpracování tohoto signálu. Zatímco komutačních pulzů připadne na otáčku šest, impulzy z Hallovy sondy jsou za otáčku čtyři, signál s komutačními pulzy má tedy také mírně větší rozlišovací schopnost, co se týče informace o poloze natočení hřídele.





Obr. 2.7: Snímek z osciloskopu – signál z Hallova senzoru (kanál 4, zelený) a signál s komutačními pulzy (kanál 3, fialový).

## 2.2 Měření vzorků signálu

Nejprve byly pro potřeby této práce zachyceny osciloskopem různé průběhy signálů (obr. 2.3, 2.6 a 2.7)). Měření probíhalo ve firmě Honeywell na aktuátoru Smart-Act, který obsahoval již opotřeбенý motor, vše bylo měřeno bez zatížení aktuátoru. Signál s komutačními pulzy s odfiltrovanou PWM byl měřen dle obr. 2.2 na svorce B, za dolní propustí  $8,4\text{ k}\Omega$  a  $C1 = 100\text{ nF}$ .

Pro potřeby simulace navrhovaných metod zpracování signálu v MATLABU bylo dále provedeno několik měření signálů. Tato měření byla provedena ve stejném zapojení jako předchozí, jen s mírně odlišnou dolní propustí  $9,7\text{ k}\Omega$  a  $15\text{ nF}$ . K zobrazení průběhů byl opět použit osciloskop, naměřená data byla uložena v textové podobě pro další zpracování. Byly měřeny signály proudu motoru, napájecího napětí a výstupní signál z Hallovy sondy. Měření probíhala na nových i starých aktuátorech, pro 3 varianty napájecího napětí (nominální napětí  $24\text{ V}$  a dále jeho kolísání  $\pm 20\%$ ) a 2 varianty zatížení (bez zátěže a s téměř maximální zátěží). Počet takto provedených měření znázorňuje následující tabulka.

	Počet vzorků	Počet variant		Měření celkem
		Napájecí napětí	Zatížení	
Nový aktuátor	2	3	2	12
Starý aktuátor	2	3	2	12
		Součet		24

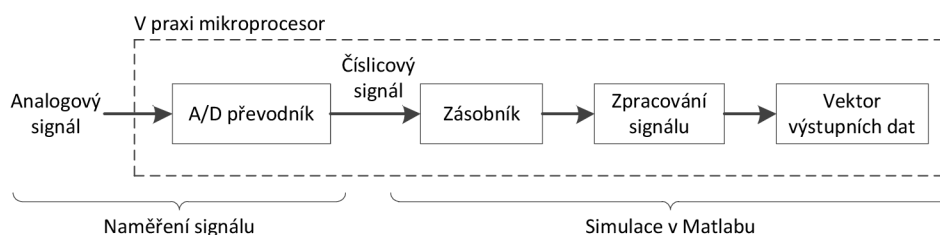
Kromě těchto měření na osciloskopu, který umožňuje zachytit relativně krátký úsek signálu, byla naměřena na opotřebovaném aktuátoru delší data pomocí měřicí karty a softwaru LabView od National Instruments. Seznam přístrojů použitých při všech měřeních je v příloze. Naměřená data jsou také v elektronické podobě na přiloženém CD ve složce *MATLAB\_Zdroj\_kody\_namerena\_data*

### 3 POPIS NAVRHOVANÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU A JEJICH SIMULACE

V této kapitole jsou rozebrány navrhované přístupy ke zpracování signálu proudu motoru. Ty jsou výsledkem studia literatury, konzultací a hledání algoritmu. Bude diskutována vhodnost přístupů co se týče spolehlivosti i náročnosti na hardwarovou implementaci a bude popsána simulace metod, jež byla provedena v prostředí MATLAB.

#### 3.0.1 Simulace zpracování signálu

Obecně následující popsané metody zpracování signálu fungují v simulaci (a později případně v praxi) tak, že procesor, který bude signál zpracovávat, bude mít hned za A/D převodníkem na vstupu zásobník, který se nejprve musí naplnit určitým počtem vzorků signálu. Až když je zásobník naplněn, může na tomto takzvaném okně signálu proběhnout jeho vyhodnocení. S každým dalším načteným vzorkem probíhá nové vyhodnocení signálu ze zásobníku, přičemž když do zásobníku přijde nový vzorek, nejstarší vzorek je zahozen (zásobník FIFO – first-in first-out). Při simulaci je k dispozici konečný počet vzorků vstupního signálu, proto je vektor výstupních dat (informace o rychlosti motoru) potom o délku tohoto zásobníku kratší. Tento princip vyjadřuje obr. 3.1. Jedná se tedy o zpracování signálu pomocí posouvaného okna. Cílem zpracování signálu je detekovat komutační pulzy, resp. kmitočty, první harmonickou složku signálu, což je informace o rychlosti otáčení motoru.

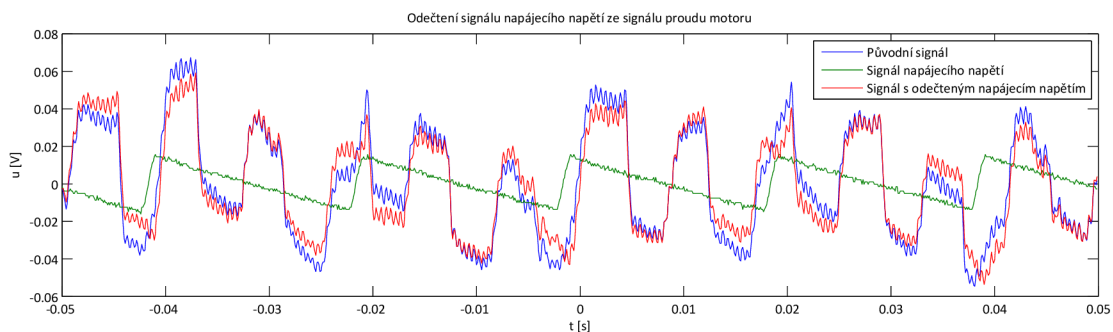


Obr. 3.1: Způsob zpracování signálu

#### 3.0.2 Kompenzace vlivu napájecího napětí

Tato myšlenka spočívá v odečtení vlivu zvlněného napájecího napětí od signálu proudu motoru (viz kapitola 2.1.2). Oba signály se úrovnově velmi liší – napájecí

napětí má velikost 24 V, signál proudu motoru na snímacím rezistoru ( $5,62 \Omega$ ) má velikost řádově v desetinách voltů (200–300 mV). V praxi by tedy bylo třeba napájecí napětí nějakým způsobem snížit (např. děličem napětí, snížením úrovně a oddělením ss. složky kondenzátorem). V číslicové podobě signálů byla při simulaci nejprve vypočtena střední hodnota signálů (za určitý čas) a tato střední hodnota byla od signálů odečtena. Tím byly signály zbaveny ss. složky. Před odečtením bylo ještě potřeba vyřešit úlohu, jakou měrou se napájecí napětí moduluje na signál proudu motoru. Toto bylo teoreticky vypočteno za předpokladu, že motor a snímací rezistor jsou také dělič napětí (viz obr. 2.2). Odpor vinutí a jeho indukčnost vystupuje jako jedna impedance, odpor snímacího rezistoru jako druhá. Pro kmitočet 120 Hz (přibližný kmitočet, který mají komutační pulzy v signálu proudu motoru) byla spočtena reaktance vinutí a byl vypočten poměr, kterým by se měl signál napájecího napětí podělit. Ovšem tento poměr není adekvátní, zvlnění napájecího napětí by bylo stále příliš velké (po odečtení by byl signál proudu motoru ještě horší). Poměr byl tedy určen experimentálně, dle posouzení tvaru signálu a porovnání se signálem stejnosměrně napájeného motoru. Na obr 3.2 jsou oba signály (naměřený i odečtený) spolu s již poděleným napájecím napětím. U naměřeného signálu si lze všimnout vlivu skoků napájecího napětí (zvlněného po jednocestném usměrnění), u odečteného pak nápravy ve stejných místech. Při ověřování vhodných algoritmů budou tyto také testovány na neodečteném signálu, aby se zjistilo, zda je vůbec toto odečítání nutné.



Obr. 3.2: Odečtení signálu napájecího napětí

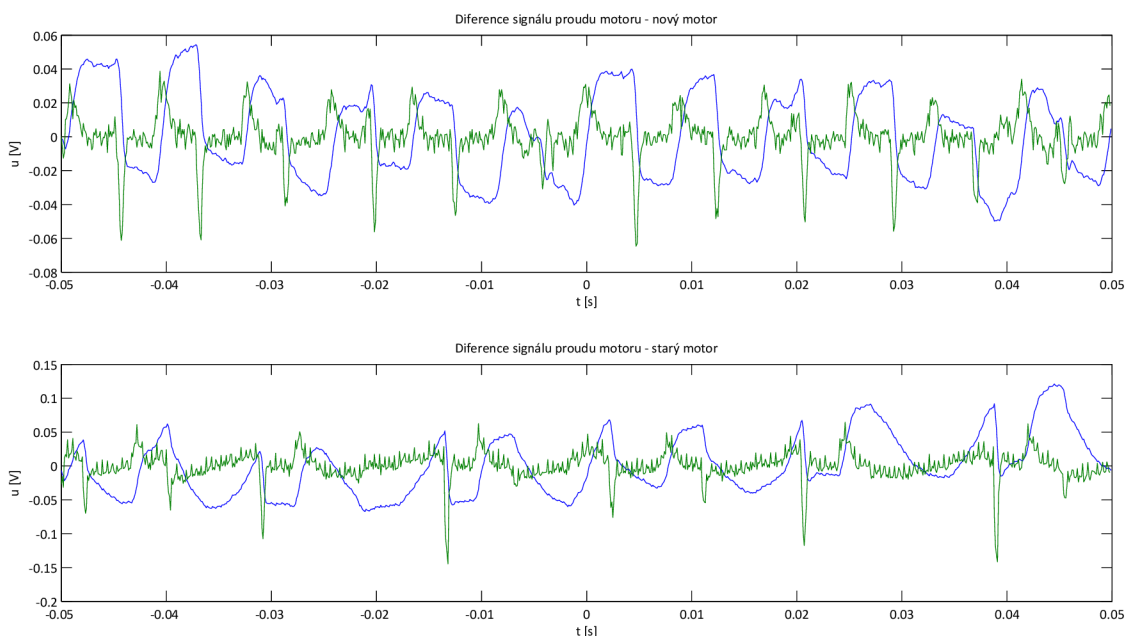
### 3.0.3 Diference signálu

Tento přístup vychází z původního analogového řešení, jak ho rozpracoval ve své práci Holger Bubser [3], viz také obrázek 2.4. Signál proudu motoru je po filtraci dolní propustí jednoduše zderivován, čemuž v číslicové podobě odpovídá diference.

Jako číslicová dolní propust byl použit filtr, který počítá plovoucí průměr (více v kapitole 3.1 nebo [13]). Diference je rozdíl mezi hodnotami dvou sousedních vzorků signálu, spojitě chápané derivaci se pouze blíží. V MATLABU se jedná o funkci `diff` a výsledkem je vektor, jehož prvky se počítají dle vztahu

$$x(2) - x(1), x(3) - x(2), \dots, x(N) - x(N - 1), \quad (3.1)$$

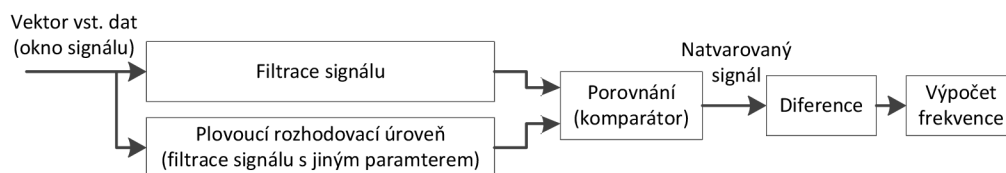
kde  $x$  jsou prvky vstupního vektoru,  $N$  je počet těchto prvků a prvky vektoru diference jsou odděleny čárkou. Vektor diference tak bude logicky o jeden prvek kratší. [22] Na následujícím obrázku je vidět signál proudu motoru (filtrovaný) a jeho diference. U nového motoru jsou špičky diference celkem dobře patrné a pravděpodobně by byly bez problému detekovatelné. Při aplikaci na signál ze starého motoru ovšem vidíme, že kvůli špatnému tvaru signálu nejsou špičky diference všude, kde by měly být (signál se mění příliš pozvolně, má nevhodný tvar). Tento přístup byl tedy vyhodnocen jako neperspektivní, proto nebyl dále uvažován.



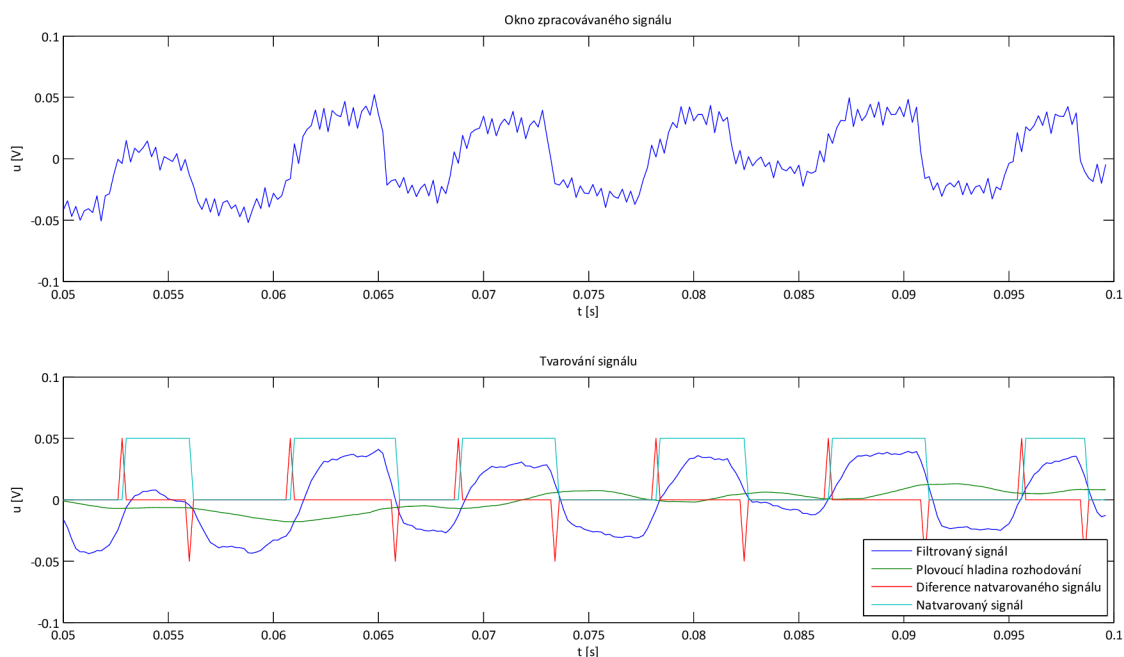
Obr. 3.3: Diference signálu

### 3.1 Tvarování signálu

První metodou je jednoduché tvarování signálu. Postup znázorňuje obr. 3.4. Vektor vstupních dat (okno signálu) je vždy filtrován dvojím způsobem - jednou jako užitečný signál, aby při následné komparaci nedocházelo k chybnému přeskokování komparátoru vlivem mírných zákmitů - jde tedy v podstatě o číslicovou dolní propust. Souběžně je signál filtrován pro získání rozhodovací hladiny, která je plovoucí, což je výhodné, protože signál může s velmi nízkou frekvencí měnit svou úroveň (např. vliv převodovky, zvýšení signálu proudu motoru při dojezdu do koncové polohy). Pro obojí filtraci byla v MATLABU použita funkce `filter`. Jedná se o funkci, která počítá plovoucí průměr, v podstatě projde data podobně jako cyklus `for`, přičemž jejím parametrem je počet vzorků, ze kterých průměr počítá. Jde o stejný přístup zpracování signálu pomocí posouvaného okna, ovšem z okna se pouze počítá průměrná hodnota vzorků. Pro filtraci užitečného signálu je tedy počet vzorků v okně nízký, pro získání plovoucího průměru vysoký. Oba tyto signály jsou potom mezi sebou jednoduše porovnány a výstupem je natvarovaný signál o dvou úrovních, kdy jedna úroveň vyjadřuje, že hodnota užitečného signálu je větší než rozhodovací úroveň a druhá úroveň vyjadřuje stav opačný. Diferencí tohoto tvarovaného signálu je získán signál vyjadřující špičkami časy změn tvarovaného signálu a díky jejich znalosti je v okně následně spočtena průměrná frekvence. Sousední časy derivačních špiček (překlápění komparátoru) jsou od sebe vždy odečteny, tím je získána perioda, na konci okna je pak vždy vypočtena průměrná doba trvání této periody (z period v okně) a tím i frekvence. Na obr. 3.4 jsou všechny vzniklé signály vidět. V horní části je vstupní vektor dat, ve spodní je potom signál po filtraci, s plovoucí rozhodovací hladinou, natvarovaným signálem i diferencí. V důsledku je tedy tvarováním signálu dosaženo stejného typu signálu jako je signál z Hallovy sondy, jehož zpracování je pak velmi jednoduché a hardwarově nenáročné, není však očekávána vysoká spolehlivost. [13]



Obr. 3.4: Schéma tvarování signálu



Obr. 3.5: Průběhy tvarování signálu

## 3.2 Korelační analýza

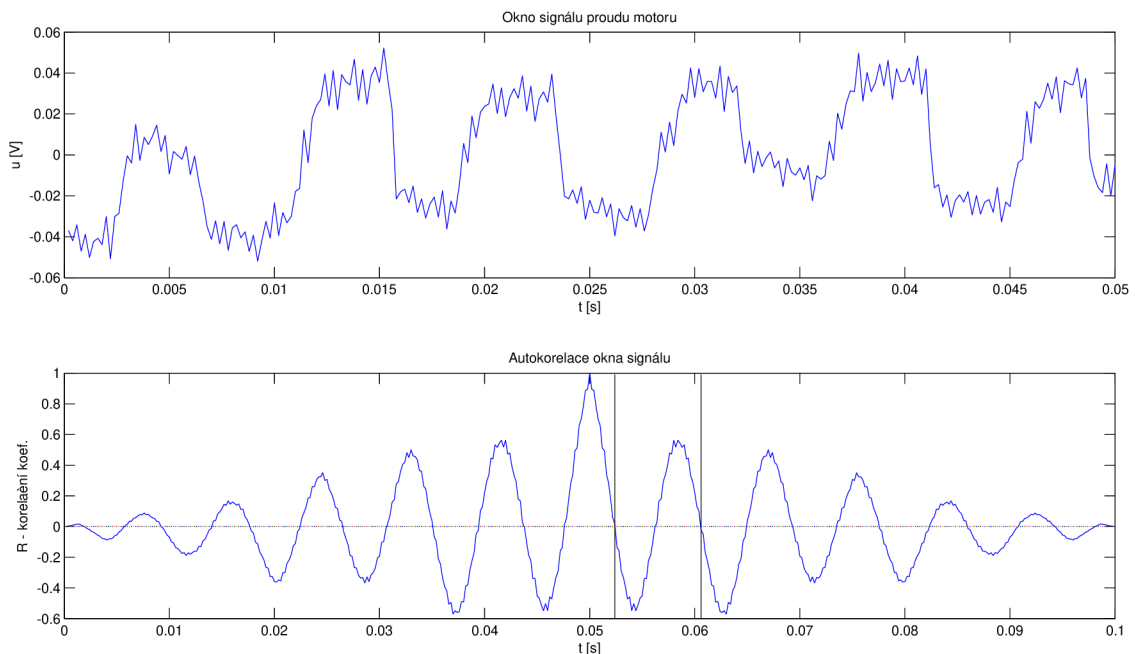
Další možnost, jak signál zpracovávat a vyhodnocovat, je korelace, resp. korelační funkce, která vyjadřuje míru podobnosti mezi dvěma signály. Původní myšlenka byla taková, že by probíhal výpočet korelační funkce s jednou již načtenou periodou signálu, resp. s periodou otáčky motoru obsahující šest komutačních pulzů (která má jako celek specifický opakující se tvar). U starých motorů, kdy je signál již hodně zdeformován, by mohlo být z výsledku korelace signálu s jednou jeho takovou periodou poznat, kdy došlo k celému otočení. Tento přístup byl shledán neproveditelným, protože i když je u starých motorů signál specificky zdeformován, jednotlivé komutační pulzy si jsou stále příliš podobné, a tak není špička korelační funkce příliš zřetelná. Navíc by byl problém s určením a načtením právě jedné otáčky, se kterou by byl signál korelován. Bylo by tedy lépe použít funkci autokorelační, která je definována jako korelační funkce sama se sebou. Korelací dvojice náhodných proměnných  $x$  a  $y$  nazýváme střední hodnotu jejich součinu. Korelační posloupnost je funkce posunutí ( $\tau$ ) posloupnosti  $x(n)$  vůči posloupnosti  $y(n)$ , kde  $n = 0, 1, \dots, M - 1$ . V případě autokorelace je  $x(n) = y(n)$  a vzorec pro výpočet autokorelační posloupnosti je následující (u spojitých funkcí by sumy přešly v integrály):

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M x(i)x(i - \tau) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M x(i + \tau)x(i) \quad (3.2)$$

Jedná se tedy o korelaci mezi členy téže řady pozorování a lze tak určit tzv. soběpodobnost signálu, tedy zda se např. signál v určitých periodách neopakuje. V prostředí MATLAB k výpočtu autokorelační posloupnosti složí funkce `xcorr`. Autokorelační posloupnost může být dále vyšetřována různými způsoby, v časové i frekvenční oblasti. [22] [9]

### 3.2.1 Časová analýza autokorelační funkce

Vypočtená autokorelační funkce (resp. posloupnost) nad oknem signálu je na obr. 3.6. Tato posloupnost má dvakrát větší délku, než posloupnost (signál), ze které je počítána. Pro potřeby vyšetřování v časové oblasti stačí uvažovat pouze jednu polovinu posloupnosti, v tomto případě např. od 0.05 do 0.1 s. Perioda signálu se projeví v periodě autokorelační funkce, resp. dá se zjistit např. z polohy jejích maxim (časový rozdíl mezi prvním a druhým maximem odpovídá periodě původního signálu), nebo z polohy průchodů nulou (vyznačeny svislými čarami) – tento způsob vyšetření byl použit v této práci. Tato metoda není příliš výpočetně náročná.



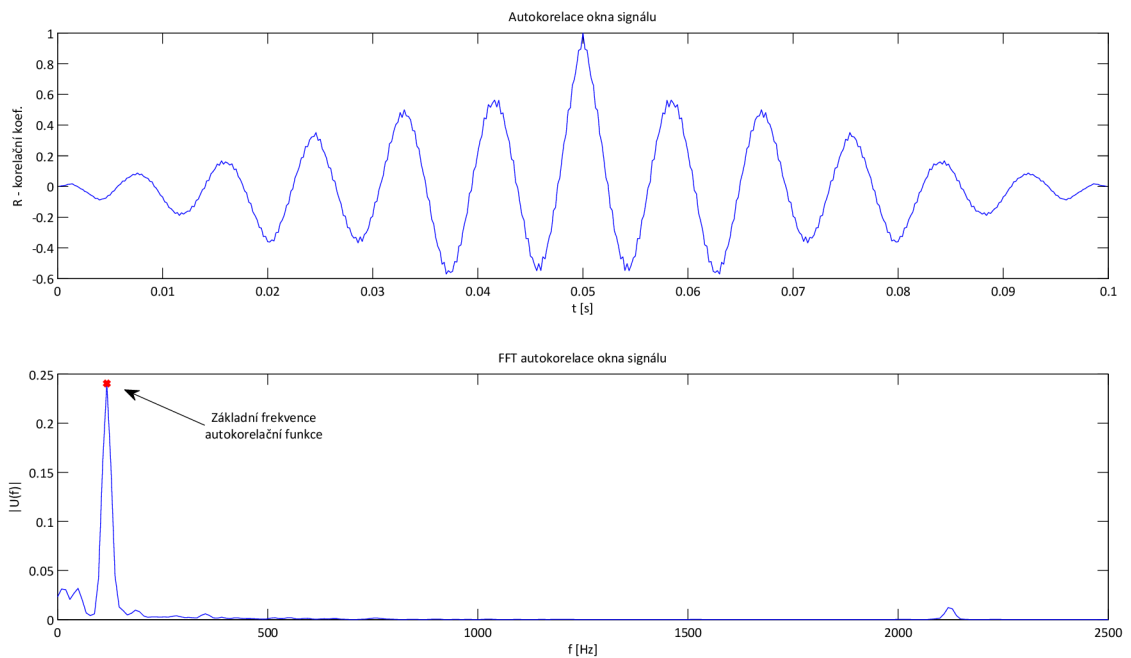
Obr. 3.6: Autokorelace signálu proudu motoru



### 3.2.2 Spektrální analýza autokorelační funkce

Další možností, jak zjistit základní kmitočet autokorelační posloupnosti, je výpočet jejího spektra pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT), resp. jejího odhadu algoritmem FFT (rychlá Fourierova transformace). Tento algoritmus se používá kvůli rapidní úspoře výpočtů oproti použití DFT. Základní myšlenkou je rozdělení původního počtu  $N$  vzorků originální posloupnosti na dvě dílčí a to výběrem vzorků se sudým a lichým pořadovým indexem (decimace). Pokud bude původní počet  $N = 2^m$ , kde  $m$  je celé číslo, pak bude možné v takovém dělení pokračovat, až zůstanou jen dvojice vzorků. Více v literatuře [22], [7]. V prostředí MATLAB byla použita funkce `fft`.

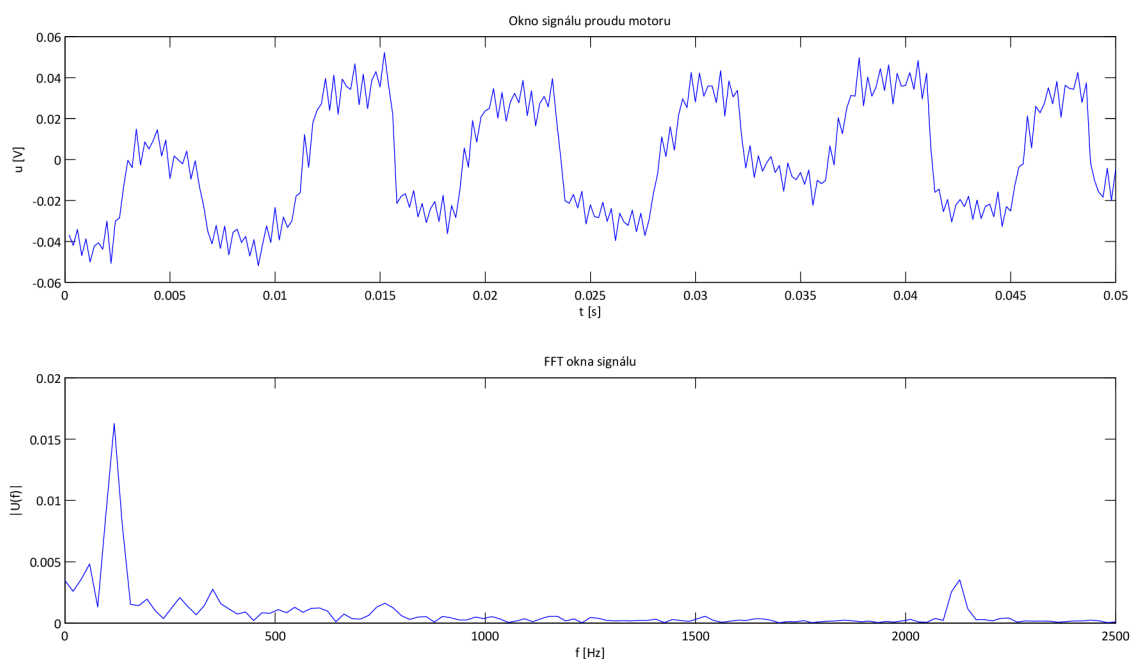
Odhad spektra autokorelační posloupnosti je na obr. 3.7. Jednoduše pak stačí najít vrchol, polohu nejvyšší hodnoty posloupnosti, která udává nejvíce se projevující frekvenci v autokorelační posloupnosti. Vzhledem k téměř harmonickému tvaru autokorelační posloupnosti by se dalo očekávat, že takové vyšetření signálu (provést nad ním autokorelaci a tu vyšetřit FFT algoritmem) bude velmi robustní, spolehlivé, ovšem již výpočetně náročnější, než vyšetřování autokorelace pouze v časové oblasti.



Obr. 3.7: Spektrum autokorelace signálu proudu motoru

### 3.3 Spektrální analýza signálu

Tento způsob vyšetřování signálu je téměř stejný jako předchozí vyšetřování autokorelační funkce ve frekvenční oblasti s tím rozdílem, že ve frekvenční oblasti je vyšetřován přímo samotný signál. Je použit také algoritmus FFT. Okno signálu a odhad jeho spektra pomocí FFT je na obrázku 3.8. Nad oknem signálu vždy proběhne odhad spektra, ve vektoru spektra je pak nalezena poloha nejvyšší hodnoty, která udává základní frekvenci (nejvíce se projevující frekvenci) ve zpracovávaném signálu. Signál je před zpracováním FFT váhován Hannovým oknem. Výpočetní náročnost je podobná, ale nižší, než u předchozí metody. Více literatura [22], [7].



Obr. 3.8: Spektrum signálu proudu motoru

### 3.4 Vyhodnocení signálu z Hallovy sondy

Také signál z Hallovy sondy, jako kontrola správné rychlosti a polohy, byl zpracováván a to metodou podobné tvarování signálu, ovšem k žádnému tvarování již nedochází, obdélníkový signál z Hallovy sondy prochází diferencí a zaznamenávána je opět doba mezi sousedními špičkami (perioda) a tím frekvence. Toto probíhá po stejných oknech signálu jako zpracování signálu proudu motoru. Druhý způsob kontroly bylo spočtení průměrné rychlosti (počtu derivačních špiček) za celý čas

naměřeného signálu, to je správná hodnota v případě, že v daném úseku je rychlost konstantní.

### 3.5 Programové řešení simulace

Následuje popis simulace v prostředí MATLAB, který může posloužit i k orientaci ve zdrojových kódech, které jsou součástí příloh pouze v elektronické podobě na přiloženém CD ve složce *MATLAB\_Zdroj\_kody\_namerena\_data*. Zdrojové kódy jsou také patřičně okomentovány.

Simulace zpracování signálu byla v MATLABu realizována dvěma skripty, z nichž první obstarává úlohu naměření (načtení) signálu a druhý samotnou simulaci (viz obr. 3.1). Pro odlišení funkcí nově v této práci vytvořených od funkcí již v MATLABu implementovaných jsou tyto odlišeny příponou *.m*, tudíž jsou popisovány jako soubory zdrojového kódu.

1. Skript *NactiZobraz.m* obsahuje na začátku výběr souboru, ze kterého mají být načtena naměřená data. Ten je realizován několika funkcemi (*nacti.m*, *nacti1.m*, *nacti2.m*, *nactihall.m* - dle zvoleného zdrojového souboru dat), které využívají funkci *importdata*. Následuje ještě možnost výběru pouze určité části signálu – možno zadat přímo v sekundách. Po načtení signálů, nastavení parametrů skript vypočítá vzorkovací frekvenci a periodu a graficky zobrazí všechny načtené signály.
2. Skript *Main.m* provádí již samotné vyhodnocování popsány metodami. Na začátku obsahuje nastavení parametrů, z nichž nejdůležitějším je délka okna vyhodnocování signálu. Ta je zadávána v jednotkách času (sekundách). Zadány mohou být také parametry filtrace signálu pro metodu tvarování signálu. Po nastavení parametrů proběhne cyklus *for*, který simuluje posouvané okno signálu. V cyklu je volitelně v daném okně provedeno vždy odečtení napájecího signálu od signálu proudu motoru a je vypočtena autokorelace okna signálu funkcí *xcorr*. Následně jsou volány funkce s vyhodnocováním dle příslušných metod, jejichž výstupem je vždy frekvence signálu proudu motoru v daném okně, která se pohybuje kolem hodnoty 120 Hz (po proběhnutí celého cyklu tedy vektor délky vstupujícího signálu bez délky okna). Signál proudu motoru je vyhodnocován těmito čtyřmi funkcemi:
  - (a) Funkce *akorcas2.m* vyhodnocuje vypočtenou autokorelaci v časové oblasti hledáním 1. a 3. průchodu nulou, určením periody z časových poloh těchto průchodů a výpočtem frekvence z této periody.
  - (b) Funkce *akorspekt.m* vyhodnocuje vypočtenou autokorelaci ve frekvenční oblasti pomocí funkce *fft*, následně vyhledáním maximální hodnoty ve

vypočtených koeficientech FFT a určením její polohy získá hledanou frekvenci signálu. Toto fungovalo bez problému u nových aktuátorů, u starších však často docházelo k chybnému vyhodnocování, protože jiné frekvenční složky byly zřetelnější (stejnoseměrná složka nebo složka v okolí 60 Hz, vliv může mít např. vlastní rezonanční kmitočet vinutí motoru, viz spektrum na obr. 4.1). Proto bylo pro zvýšení spolehlivosti nutno vybrat správnou špičku ve spektru, což bylo provedeno oříznutím spektra odspodu na 80 Hz. Spolehlivost se výrazně zvýšila, nicméně se tím změnila minimální rozpoznatelná rychlost z 0 na 800 ot./min. (6 komutačních pulzů na otáčku). To je nevýhoda, ovšem v případě aktuátorů jde o stálé udržování konstantní rychlosti.

- (c) Funkce `oknofft.m` vyhodnocuje přímo signál ve frekvenční oblasti stejným způsobem jako předchozí.
- (d) Funkce `tresh2.m` vyhodnocuje signál již popsanou metodou tvarování signálu, z časů mezi derivačními špičkami vypočte průměrnou periodu a tím frekvenci v daném okně.

V cyklu následuje ještě funkce `tresha12.m`, která vyhodnocuje signál z Hallovy sondy způsobem již popsaným (diferencí signálu), podobně jako při tvarování signálu počítá periodu (frekvenci) mezi špičkami difference signálu. Výstupní frekvence je zde kolem 80 Hz.

Po proběhnutí cyklu vyhodnocování se zobrazí některé průběhy signálů z posledního okna vyhodnocování (viz obr. 4.1). To kvůli možnosti kontroly a vyšetřování špatného vyhodnocování. Následují výpočty rychlosti otáčení motoru (v otáčkách za minutu) a polohy. Rychlost se počítá prostým násobením příslušným koeficientem, 6 pulzů (period) signálu proudu motoru proběhne za jednu otáčku motoru, zatímco 4 pulzy (periody) signálu z Hallovy sondy proběhnou také za jednu otáčku motoru. Poloha (kolikrát se motor otočil, jednotkou jsou otáčky) se vypočte integrací rychlosti, pomocí funkce `cumtrapz`. Rychlost a poloha z Hallovy sondy se zde ještě počítá, pouze pro kontrolu, průměrně z celé délky signálu (adekvátní pouze v případě konstantní rychlosti motoru v daném úseku). Dále jsou do dialogového okna vypsány výsledky a vypočteny procentuální chyby polohy jednotlivých metod, kdy vztažnou (správnou) hodnotou je poloha z Hallovy sondy. Výsledné vektory rychlosti a polohy jsou také do nového okna zobrazeny graficky (viz např. obr. A.1).

Detailně jsou funkce MATLABu popsány v dokumentaci [13].

## 4 DISKUZE VÝSLEDKŮ SIMULACE A JEJICH POROVNÁNÍ

### 4.0.1 Způsob vyhodnocení simulace

Určujícími výsledky simulace jsou vektory (posloupnosti) vypočtených rychlostí a poloh jednotlivými metodami, respektive jejich grafická reprezentace. Dle regulačního schématu v aktuátorech - viz obr. 1.6 se jedná o grafické zobrazení rychlosti a polohy, což je výstup z bloku Vyhodnocování rychlosti a polohy (místo senzoru rychlosti je ovšem použito snímání signálu proudu motoru s komutačními pulzy, takže jde o bezsenzorové řízení). Jako další ukazatel byly zvoleny chyby v poloze motoru na konci vyhodnocování. Následuje jejich tabulkové srovnání (v procentuálním vyjádření).

Z naměřených signálů byly vyhodnocovány signály délky 0,5 vteřin a to u jednoho nového a dvou starých aktuátorů (u druhého nového aktuátoru nebyly bohužel signály této délky naměřeny). Tyto signály byly naměřeny pomocí osciloskopu se vzorkovací frekvencí 2 kHz, délka okna pro vyhodnocování všemi metodami byla zvolena 0,1 s. Dále bylo vyhodnoceno několik delších signálů (až 10 vteřin) pro druhý starý aktuátor, které na něm byly naměřeny pomocí měřicí karty a softwaru Lab-View se vzorkovací frekvencí 10 kHz. I zde byla délka okna zvolena 0,1 s.

### 4.1 Vybrané výsledky graficky

Grafická reprezentace výsledků je v příloze, zde pouze komentář. Bylo vybráno pouze šest grafů pro stručnost a přehlednost. Všechny ostatní grafické výsledky jsou pak v elektronické podobě na přiloženém CD ve složce *Graficke\_vysledky*.

Na *novém nezatíženém aktuátoru* – obr. A.1 – je vidět, že všechny metody pracují relativně dobře, mírně odlišný výsledek má metoda tvarování signálu.

Když je tento *aktuátor zatížen* (v praxi téměř stále) – obr. A.2 – nedochází k téměř žádné změně oproti nezatíženému, což je očekávatelné, naopak vyhodnocování by při zatížení mělo fungovat lépe, protože komutační pulzy v signálu proudu motoru jsou zřetelnější.

Na *opotřebeném nezatíženém aktuátoru* – obr. A.3 – si už lze všimnout špatného vyhodnocování časovou analýzou autokorelace. To se v tomto případě příliš neprojevuje ve vyhodnocení polohy, ale u vyhodnocení rychlosti je vidět, že problém je markantní. Trochu hůře je na tom také vyhodnocení tvarováním signálu.

Při *zatížení opotřebeného aktuátoru* – obr. A.4 – jsou výsledky podobné, na základě špatného vyhodnocování časovou analýzou autokorelace je vidět už i problém

ve vyhodnocení polohy.

Na grafech A.5 a A.6 je vidět na delším úseku signálu (1,5 s a 10 s) vyhodnocování pouze těch metod, které pracují ve spektrální oblasti – spektrální analýza autokorelace a spektrální analýza signálu. Obě metody vyhodnocují signál velmi dobře, odchylky od koncové polohy jsou minimální. Lze si povšimnout pravidelného kolísání rychlosti na velmi nízkém kmitočtu. To je pravděpodobně způsobeno nedokonalostmi převodovky.

## 4.2 Tabulkové srovnání výsledků

Následují tabulky pro různé aktuátory a různé kombinace jejich zatížení a velikosti napájecího napětí ( $\pm 20\%$ ). Výsledky pro signály délky 0,5 s jsou v tabulce 4.1. Pro každou kombinaci byly procentuální chyby polohy průměrovány (v jejich absolutní hodnotě, aby nedošlo ke zkreslení výsledků) a následně byly vypočteny celkové chyby na základě sady měření, které tak slouží jako ukazatel přesnosti dané metody. V tabulce 4.1 jsou tyto chyby uvedeny úplně dole. Nejlépe tedy z použitých metod zpracování signálu vychází podle očekávání (jako nejrobustnější) spektrální analýza autokorelace s průměrnou chybou 1,01 % pro všechny naměřené a simulované situace. Spektrální analýza signálu s chybou 1,29 % má také dobrý výsledek, v některých situacích (např. při nižším napájecím napětí a nezatíženém aktuátoru) má dokonce lepší výsledky. Chyba tvarování signálu vychází na 5,43 % a nejhorší výsledky má časová analýza autokorelace s 10,17 %.

V následující tabulce 4.2 jsou pak výsledky pro situaci, kdy by se od signálu proudu motoru neodečítal vliv signálu napájecího napětí. Výsledky jsou uvedeny pouze pro nominální napětí a pro srovnání jsou uvedeny stejné výsledky (pouze pro nominální napětí) vypočtené ze stejných hodnot uvedených v předchozí tabulce. Je vidět zhoršení u metod vyšetřujících signál v časové oblasti (tvarování signálu a časová analýza autokorelace). Zajímavé však je, že u metod vyhodnocujících signál ve spektrální oblasti dochází dokonce ke zlepšení. Nejlepší metoda (spektrální analýza autokorelace) má tak průměrnou chybu 0,56 %, zatímco při eliminaci vlivu napájecího napětí má chybu 0,72 %. Při použití metod ve spektrální oblasti by se tak nemuselo přistupovat k eliminaci vlivu napájecího napětí. Na vyšetřování ve spektrální oblasti by napájecí napětí nemělo mít vliv, protože složky nižší než 80 Hz nejsou v simulaci brány v potaz.

Procentuální chyby při simulaci na delších signálech byly dle grafu simulace A.5 (1,5 s) pro spektrální analýzu autokorelace 0,002 % a pro spektrální analýzu signálu 1,29 %. Pro simulaci dle grafu A.6 (10 s) pro spektrální analýzu autokorelace 0,27 % a pro spektrální analýzu signálu 0,04 %.

Nominální napájecí napětí, nezatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-0,77	-4,60	-0,29	-0,39
Starý aktuátor 1	-1,43	2,65	1,06	1,31
Starý aktuátor 2	-4,26	-3,08	1,85	0,49
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	2,16	3,45	1,06	0,73

Nominální napájecí napětí, zatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-0,97	-5,18	-0,56	-0,90
Starý aktuátor 1	-7,72	-15,06	-0,20	-0,30
Starý aktuátor 2	-5,61	19,01	-0,35	-2,11
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	4,77	13,08	0,37	1,10

Nižší napájecí napětí, nezatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-4,83	-5,34	0,90	0,31
Starý aktuátor 1	0,72	-0,37	1,00	0,76
Starý aktuátor 2	-5,34	9,64	-0,21	-0,05
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	3,63	5,12	0,70	0,37

Nižší napájecí napětí, zatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-5,38	-18,64	-0,04	-0,14
Starý aktuátor 1	5,28	-1,05	5,95	6,50
Starý aktuátor 2	-22,97	32,67	0,01	-0,63
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	11,21	17,45	2,00	2,42

Vyšší napájecí napětí, nezatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-8,74	-2,44	2,21	2,05
Starý aktuátor 1	1,11	-0,32	1,30	1,27
Starý aktuátor 2	-6,87	-43,95	1,13	-4,99
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	5,57	15,57	1,55	2,77

Vyšší napájecí napětí, zatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-2,78	-5,21	-0,04	-0,41
Starý aktuátor 1	-1,72	-10,12	-0,86	-0,36
Starý aktuátor 2	-11,27	-3,79	-0,17	0,25
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	5,26	6,37	0,35	0,34

Celková průměrná chyba [%]	5,43	10,17	1,01	1,29
----------------------------	------	-------	------	------

Tab. 4.1: Tabulky chyb polohy pro simulaci zpracování signálu

Nominální napájecí napětí, nezatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-0,79	-10,82	-0,25	-0,28
Starý aktuátor 1	-1,53	1,34	1,08	1,29
Starý aktuátor 2	-4,37	29,64	1,03	0,58
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	2,23	13,93	0,78	0,72

Nominální napájecí napětí, zatížen Délka signálu 0,5 s; délka okna 0,1 s	Chyba koncové polohy [%]			
	Metoda zpracování signálu	Tvarování signálu	Časová analýza autokorelace	Spektr. analýza autokorelace
Nový aktuátor 2	-7,74	-17,10	-0,52	-0,87
Starý aktuátor 1	-4,23	-13,53	-0,13	-0,16
Starý aktuátor 2	-8,06	43,81	-0,37	-1,14
Průměr chyb v jejich abs. hodnotě [%]	6,68	24,81	0,34	0,72

Průměrná chyba [%]	4,45	19,37	0,56	0,72
--------------------	------	-------	------	------

Stejná chyba s odečt. nap. napětím [%]	3,46	8,27	0,72	0,92
--	------	------	------	------

Tab. 4.2: Tabulky chyb polohy pro simulaci zpracování signálu bez odečtení napájecího napětí

### 4.3 Chybné vyhodnocování signálu a perspektiva do budoucna

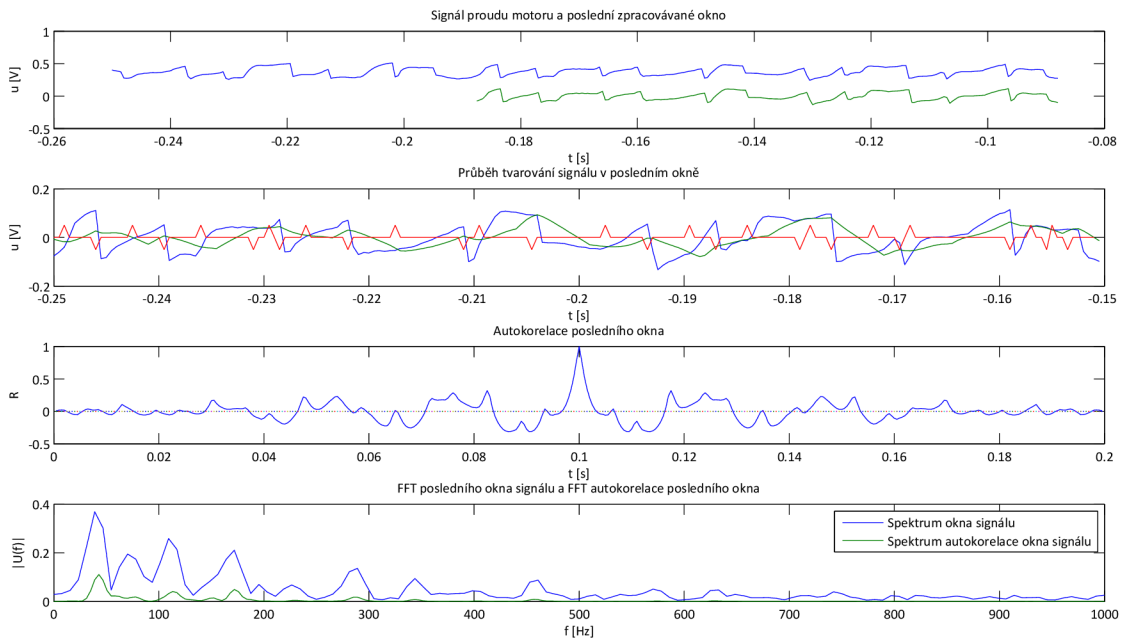
Na obr. 4.1 je příklad špatného vyhodnocování všech čtyř metod zpracování signálu na jednom z opotřebených aktuátorů. Na průběhu *tvarování signálu* je u posledního komutačního pulzu vidět několik falešných špiček difference tvarovaného signálu, což je způsobeno tím, že signál proudu motoru a plovoucí průměr zde mají přibližně stejnou hladinu a tak dochází k nechtěnému přeskokování. Tím je spočtená průměrná perioda kratší a frekvence vyšší, než ve skutečnosti. U nastavení plovoucího průměru jde o kompromis mezi téměř konstantní rozhodovací úrovní, nebo úrovní, která téměř kopíruje signál. Při použití konstantní rozhodovací úrovně, která ovšem na náhlé změny úrovně signálu reaguje s velkým zpožděním, pak při těchto změnách dojde k chybnému vyhodnocení. Zde je použita rozhodovací úroveň, která signál téměř kopíruje, reaguje rychle na jeho úrovněvé změny, ale občas dochází k zobrazenému špatnému vyhodnocování.

Na průběhu *autokorelační funkce* je vidět její chybné vyhodnocování v časové oblasti, které funguje na základě zjišťování času mezi 1. a 3. průchodem funkce nulou. Zde je vidět (přibližně v čase 0,10 až 0,11 s), že autokorelační funkce projde několikrát nulou velice rychle, tudíž vyhodnocený časový interval je příliš krátký a výsledná



frekvence příliš vysoká. Neharmonický tvar autokorelační funkce je způsoben tvarem signálu proudu motoru již opotřebeného aktuátoru.

Průběhy odhadu spektra obou *spektrálních metod* jsou na posledním grafu obr. 4.1 a je zde vidět, kromě užitečné hledané složky nad 100 Hz, ještě několik výrazných složek, z nichž jedna je větší, než užitečná složka (přibližně 40 Hz v tomto případě). Zde by tedy docházelo k chybnému vyhodnocování, ovšem jak již bylo popsáno, při vyhodnocení těmito spektrálními metodami byly brány v potaz pouze složky vyšší než 80 Hz, tudíž ani v tomto případě ke špatnému vyhodnocení nedojde.



Obr. 4.1: Průběhy signálů při vyhodnocování - příklady špatného vyhodnocení

### 4.3.1 Náročnost hardwarové implementace

U spektrálních metod byl použit algoritmus FFT, který dle vzorkovací frekvence k výpočtu odhadu spektra používal 256 vzorků (512 u spektrální analýzy autokorelace, jež má v čase dvakrát větší délku) – vzorkovací frekvence 2 kHz, vyhodnocovací okno 0,1 s odpovídá 200 vzorkům; nebo 1024 vzorků (2048) – vzorkovací frekvence 10 kHz, vyhodnocovací okno 0,1 s odpovídá 1000 vzorkům. Pro vyhodnocování signálu je dostatečná vzorkovací frekvence 2 kHz (max. detekovatelný kmitočet by dle Shannonova vzorkovacího teorému byl 1 kHz, což je dostatečná rezerva) nebo i trochu nižší. Při takovém a nižším počtu vzorků lze již spektrální analýzu (výpočet FFT) implementovat do levného mikroprocesoru. [16]

### 4.3.2 Další problémy při vyhodnocování

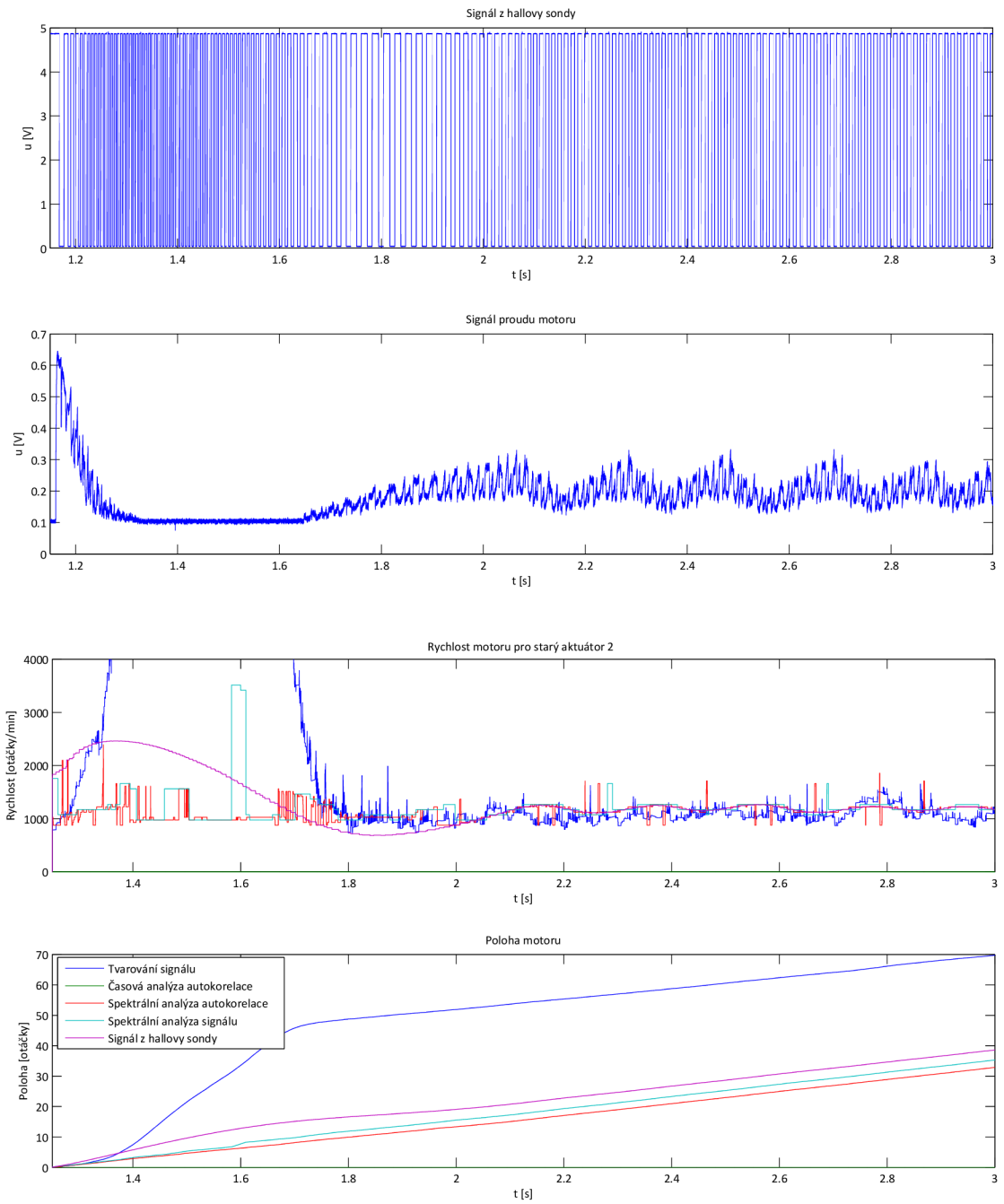
Spektrální metody zpracování signálu relativně dobře reagují na zpomalení aktuátoru zátěží (do určité míry – také podle délky vyhodnocovacího okna). Ovšem dalšími problémy při zvažovaném řízení motoru těmito metodami v praxi jsou situace jako rozběh motoru, dojezd na doraz a podobně. Signály s těmito situacemi byly naměřeny a jsou spolu s ostatními signály na přiloženém CD ve složce

*MATLAB\_Zdroj\_kody\_namerena\_data*, jejich vyšetřování však přesahuje rozsah této práce a mohlo by být předmětem další práce. Příklad reakce simulovaných metod zpracování signálu na rozjezd motoru je na obr. 4.2. Zde je jako první zobrazen signál z Hallovy sondy a signál proudu motoru. V signálu proudu motoru je vidět počáteční špička a potom náběh a ustálení zřetelných komutačních pulzů. Na pulzech z Hallovy sondy je vidět zásah regulace – motor se nejprve rychle roztočí a pak zpomalí na regulovanou hodnotu. Následují výsledky vyhodnocení rychlosti jednotlivými metodami (bez nejhorší časové analýzy autokorelace). Lze si všimnout zákmitu a ustálení dle správného signálu z Hallovy sondy. Metody vyhodnocující signál zde ale selhávají, protože úsek signálu před náběhem komutačních pulzů má jiný charakter (šum), než signál s komutačními pulzy, na který jsou metody stavěny. Z grafu polohy je pak vidět, že všechny metody jsou mimo správný průběh polohy z Hallovy sondy a tudíž bez nutných úprav v této situaci selhávají. Takovými úpravami by mohly být: pomocná logika, která je nutná např. i při otočení směru pohybu motoru apod. nebo také lepší rozpoznání kmitočtu a zamezení vyhodnocování nesmyslně vysokých kmitočtů.

Pro budoucí využití metody spektrální analýzy autokorelace signálu proudu motoru je nutné ještě tyto jevy vyšetřit (je otázkou, co způsobuje šumový úsek signálu proudu motoru při rozběhu a zda se objeví i při neregulovaném rozběhu motoru) a navrhnout jejich řešení. Je třeba také zvážit zpoždění systému, které v případě této práce odpovídá zvolené délce vyhodnocovacího okna, tedy 0,1 s; případně provést jeho optimalizaci. Následně by mohla být provedena hardwarová implementace a testování řízení touto metodou v praxi.

Pro zlepšení výsledků spektrální analýzy autokorelace by bylo také dobré zvážit například použití lepšího číslicového filtru typu FIR nebo IIR (s konečnou či nekonečnou impulsní charakteristikou), viz literatura [7].

Dle práce Holgera Bubsera [3] má každý typ motoru specifický tvar komutačních pulzů. Při použití této spektrální metody vyhodnocení signálu je vzhledem k její povaze také možné, že bude fungovat na více typech motoru a tudíž bude přenositelná i na jiný druh výrobku s podobným typem kartáčového motoru.



Obr. 4.2: Rozběh motoru - průběhy signálů

## 5 ZÁVĚR

V úvodu se práce zabývala aktuátory firmy Honeywell a problematikou řízení stejnosměrných kartáčových motorů malého výkonu. Byl zde vysvětlen problém a objasněna motivace celé práce.

V následujících kapitolách se pak práce zabývala bezsenzorovým řízením motoru metodou detekce komutačních pulzů. Tyto pulzy v signálu proudu motoru způsobuje přeskokování kartáčů mezi lamelami komutátoru. Na více aktuátorech byla naměřena sada signálů proudu motoru s různým vlivem napájecího napětí a opotřebení. Bylo navrženo několik metod zpracování signálu s komutačními pulzy. Simulace těchto metod byla realizována v prostředí MATLAB a tyto metody byly testovány na naměřené sadě signálů. Na základě výsledků byla vybrána nejlepší metoda zpracování signálu proudu motoru a to *spektrální analýza jeho autokorelační posloupnosti*. Tato metoda pracuje celkem spolehlivě – při zahrnutí negativních vlivů velikosti napájecího napětí a opotřebení komutátoru vykazuje průměrnou odchylku 1,01 %. Bylo zjištěno, že zvlnění napájecího napětí po jednocestném usměrnění nemá na vyhodnocení touto metodou nepříznivý vliv. Systém pro bezsenzorové řízení rychlosti a polohy by tak mohl používat tuto metodu vyhodnocení signálu s komutačními pulzy, pro jeho používání v praxi je však nutné provést ještě šetření dalších souvisejících problémů, pokračovat v testování, vývoji metody a provést hardwarovou implementaci.

## LITERATURA

- [1] Alex Brown's Robotics Page: *Using Encoders*. [online]. 2001 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <[http://abrobotics.tripod.com/Ebot/using\\_encoder.htm](http://abrobotics.tripod.com/Ebot/using_encoder.htm)>.
- [2] BENEŠ, Pavel, et al. *Automatizace a automatizační technika III: Prostředky automatizační techniky*. Brno: CP Books, 2005. 280 s. ISBN 80-251-0795-7.
- [3] BUBSER, Holger. *Untersuchung von Auswertungsmethoden für die Positionsbestimmung in Ventilantrieben mit einem Gleichstrommotor*. Heilbronn, 2000. 124 s. Diplomarbeit. Fachhochschule Heilbronn
- [4] Educon: *Regulace rychlosti stejnosměrných pohonů*. [online]. c2005 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <<http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2010010501>>.
- [5] FOJT, B. *Modul pro řízení DC motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2010. 57 s. Diplomová práce, vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
- [6] Hyperphysics: *DC Motor Operation*. [online]. c2011 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/motdc.html>>.
- [7] JAN, Jiří. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upravené a rozšířené vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2002, 430 s. ISBN 80-214-1558-4.
- [8] Jonatan: *Princip optických enkodérů polohy pro řízení motorů*. [online]. [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <[http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/opticke\\_ekodery.htm](http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/opticke_ekodery.htm)>.
- [9] Lecture 10: Speech Signal Analysis. In: *University College London: Department of Phonetics and Linguistics*: [online]. 2009 [cit. 24. 5. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.phon.ucl.ac.uk/courses/spsci/matlab/lect10.html>>
- [10] Mabuchi Motor [online katalogový list]. c2011 [cit. 14. 12. 2011]. Katalogový list motoru RK-370CA. Dostupné z URL: <[http://www.mabuchi-motor.co.jp/en\\_US/cat\\_files/rk\\_370ca.pdf](http://www.mabuchi-motor.co.jp/en_US/cat_files/rk_370ca.pdf)>.
- [11] *Mabuchi Motor* [online]. c2011 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <<http://www.mabuchi-motor.co.jp>>.
- [12] Michael Faraday. ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, Inc. Encyclopedia Britannica [online]. 2012 [cit. 24. 5. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/201705/Michael-Faraday>>.

- [13] Product Documentation – MATLAB. THE MATHWORKS, Inc. MathWorks [online]. 2012 [cit. 24. 5. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.mathworks.com/help/techdoc/>>
- [14] Products.ecc.emea.honeywell.com : *Katalog výrobků divize Environmental Controls* [online]. 2010 [cit. 26. 11. 2011]. Klapkové pohony SmartAct 5/10 Nm. Dostupné z URL: <[http://products.ecc.emea.honeywell.com/cz/ecatdata/pg\\_n05n10.html](http://products.ecc.emea.honeywell.com/cz/ecatdata/pg_n05n10.html)>.
- [15] Products.ecc.emea.honeywell.com [online katalogový list]. 2008 [cit. 26. 11. 2011]. N05010/N10010 – Klapkové pohony bez vratné pružiny pro modulační a 3/2 polohovou regulaci. Dostupné z URL: <<http://products.ecc.emea.honeywell.com/cz/pdf/n0510010cz01r0408.pdf>>.
- [16] Rychlá Fourierova transformace na AVR. RONEŠOVÁ, Andrea. *Domácí stránka Andrey Ronešové* [online]. 2009 [cit. 24. 5. 2012]. Dostupné z URL: <<http://home.zcu.cz/ronesova/index.php?menuitem=avrfft>>
- [17] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony - skriptum*. Vydání druhé. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2001. 86 s. ISBN 80-214-1978-4.
- [18] Solarbotics.net: *DC motor behavior*. [online]. 12. 11. 2001 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <[http://www.solarbotics.net/starting/200111\\_dcmotor/200111\\_dcmotor3.html](http://www.solarbotics.net/starting/200111_dcmotor/200111_dcmotor3.html)>.
- [19] Uzimex: *Malé stejnosměrné motory Maxon*. [online]. 18. 7. 2002 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <[http://www.uzimex.cz/soubory/20070103\\_maxon\\_serial.pdf](http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf)>.
- [20] VOJÁČEK, Antonín. Automatizace.hw.cz: *Integrované AMR senzory magnetického pole*. [online]. 12. 5. 2011 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <<http://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetického-pole>>.
- [21] VOJÁČEK, Antonín. Automatizace.hw.cz: *Magnetické senzory s Hallovým efektem – 2. použití*. [online]. 9. 12. 2007 [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné z URL: <<http://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-2-pouziti>>.
- [22] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB – začínáme se signály*. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 272 s. ISBN 80-7300-200-0.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A/D Analogově-digitální (číslicový)

AMR Anisotropická magnetická resistance

$B$  Magnetická indukce [T]

BEMF Back ElectroMotive Force – zpětná elektromotorická síla

$C$  Konstanta motoru [-]

DFT Discrete Fourier transform – diskrétní Fourierova transformace

DP Dolní propust

$F$  Síla [N]

FFT Fast Fourier transform – rychlá Fourierova transformace

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem

$l$  Délka [m]

$M$  Moment síly [Nm]

MATLAB Matrix Laboratory – interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk

MOSFET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor – polem řízený tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič

ot./min. Otáčky za minutu, jednotka rychlosti otáčení

OZ Operační zesilovač

PWM pulse width modulation; PŠM – pulsní šířková modulace

ss. stejnosměrný

stř. střídavý

$\mu\text{C}$  Micro controller – mikroprocesor, mikrokontrolér

$\Phi$  Magnetický tok [Wb]

$\omega$  Úhlová rychlost [rad/s]

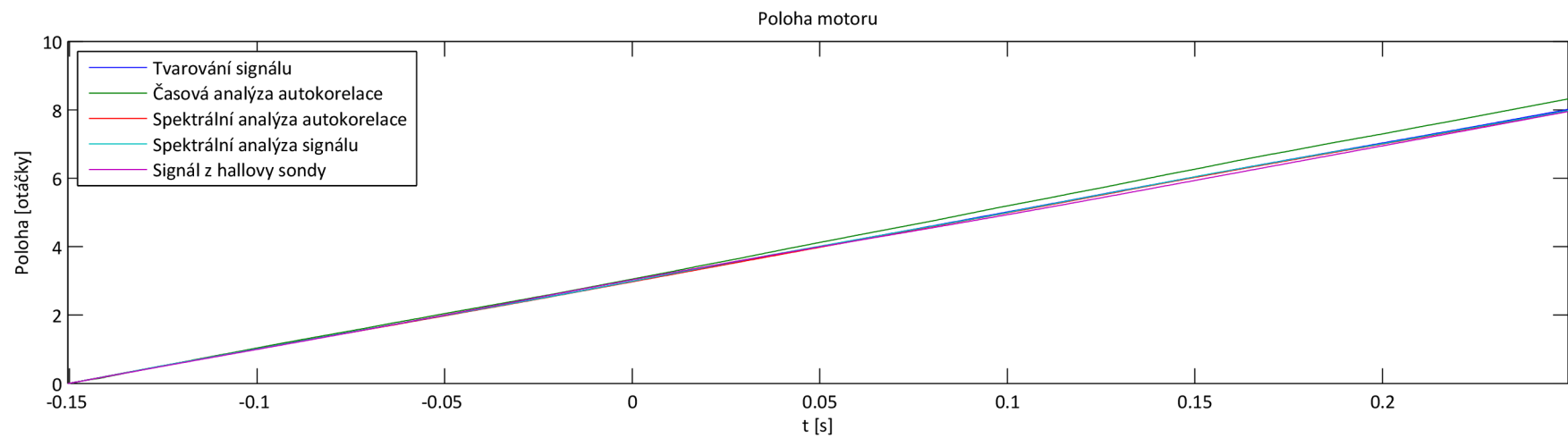
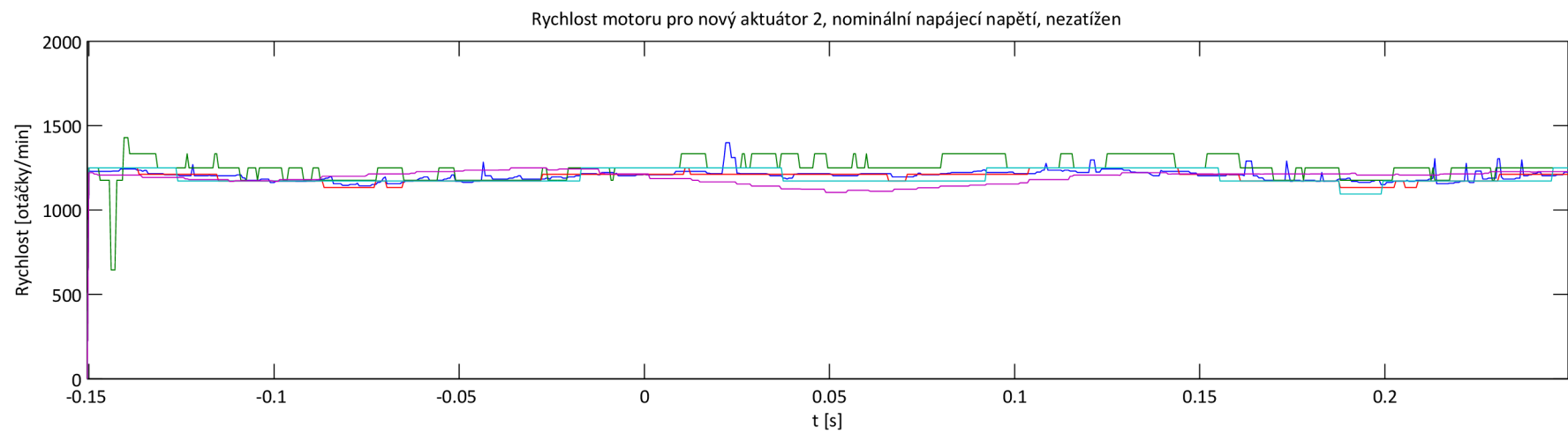
# SEZNAM PŘÍLOH

A Grafická reprezentace výsledků	48
B Použité přístroje	55
C Obsah přiloženého CD média	56

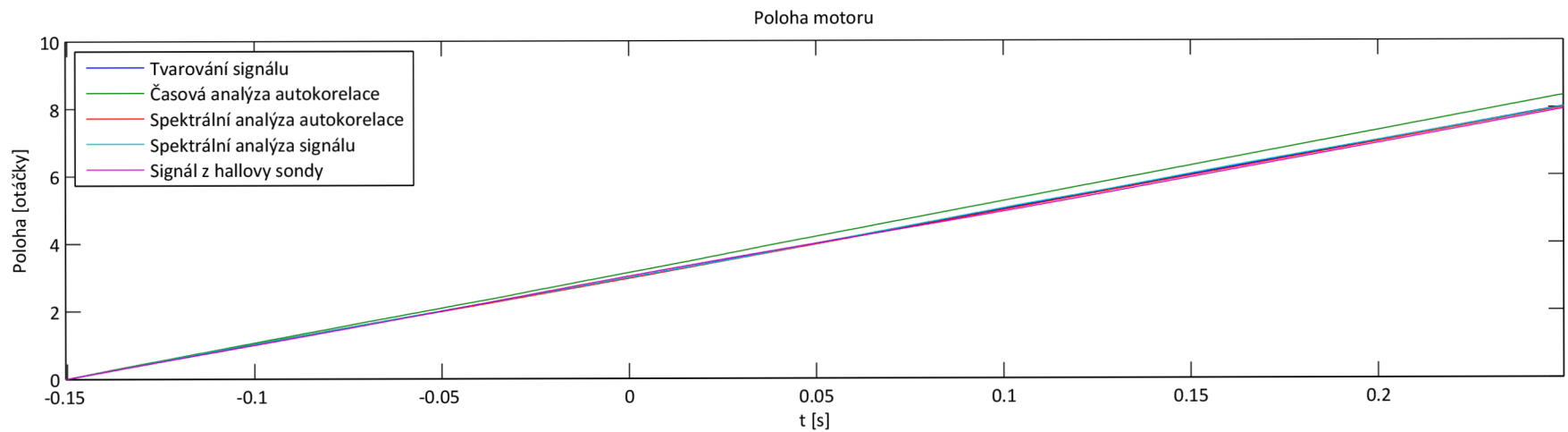
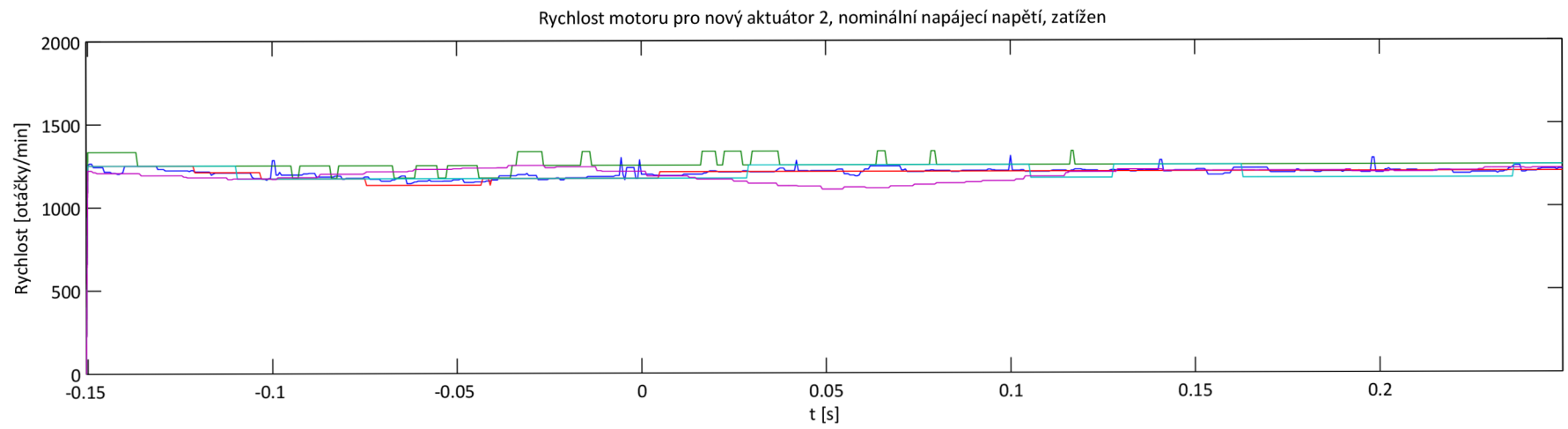


## A GRAFICKÁ REPREZENTACE VÝSLEDKŮ

Následují grafické výsledky simulace metod zpracování signálu. Přiloženy jsou výsledky pouze pro nový a opotřebený aktuátor napájený nominálním napětím, ovšem při různém zatížení. Dále jsou přiloženy dva grafické průběhy vyhodnocení delších signálů na opotřebeném aktuátoru. Všechny ostatní grafické výsledky jsou ve formátu MATLABu \*.fig na přiloženém CD ve složce *Graficke\_vysledky*.

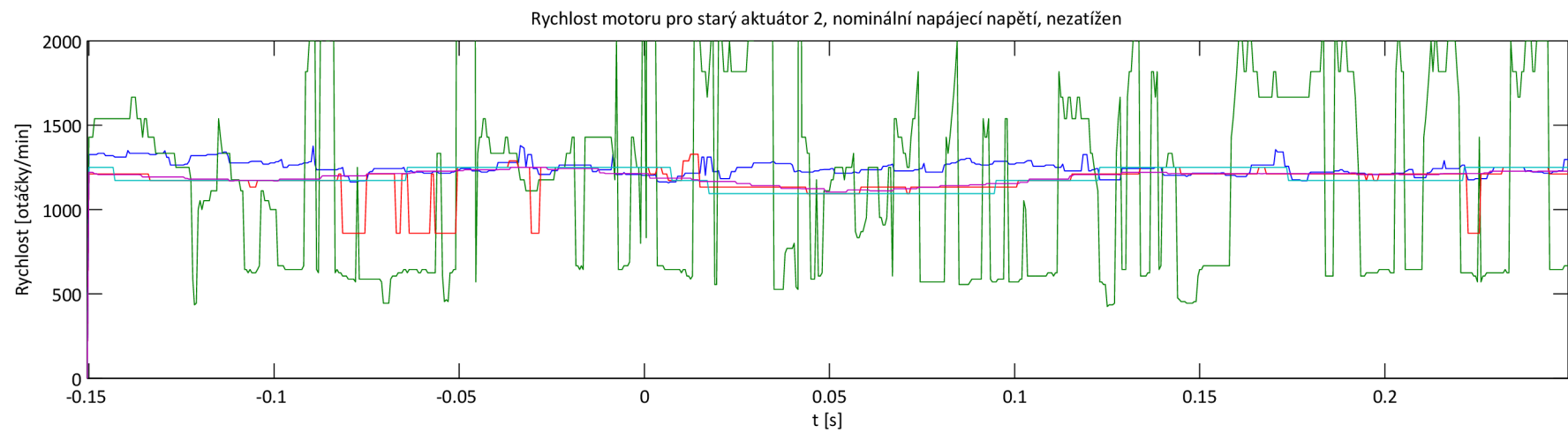


Obr. A.1: Nový aktuátor, nominální napájecí napětí, nezatížen

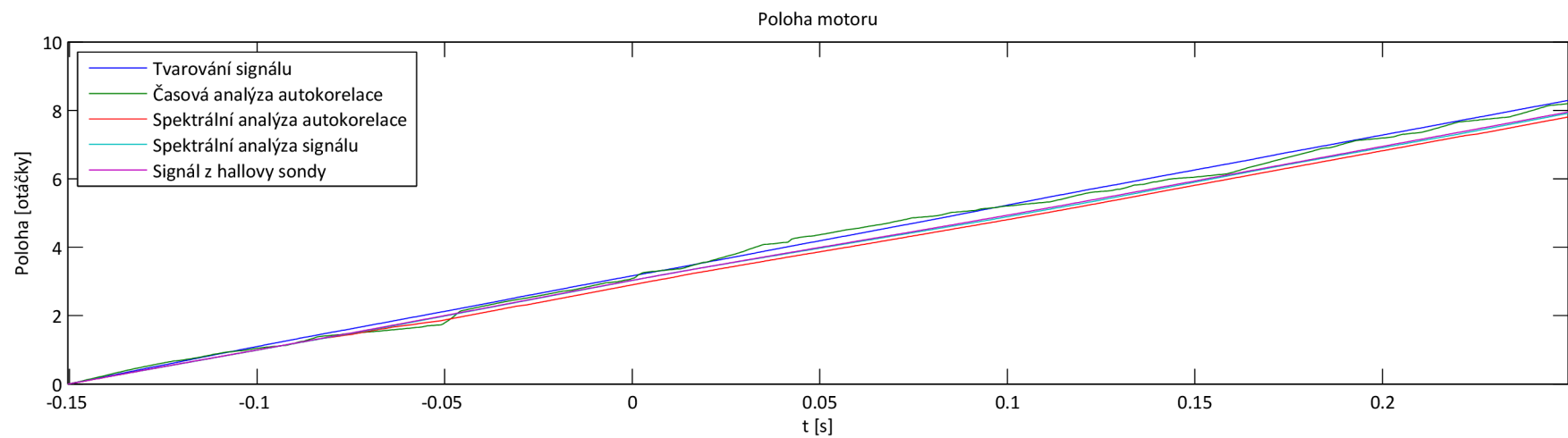


50

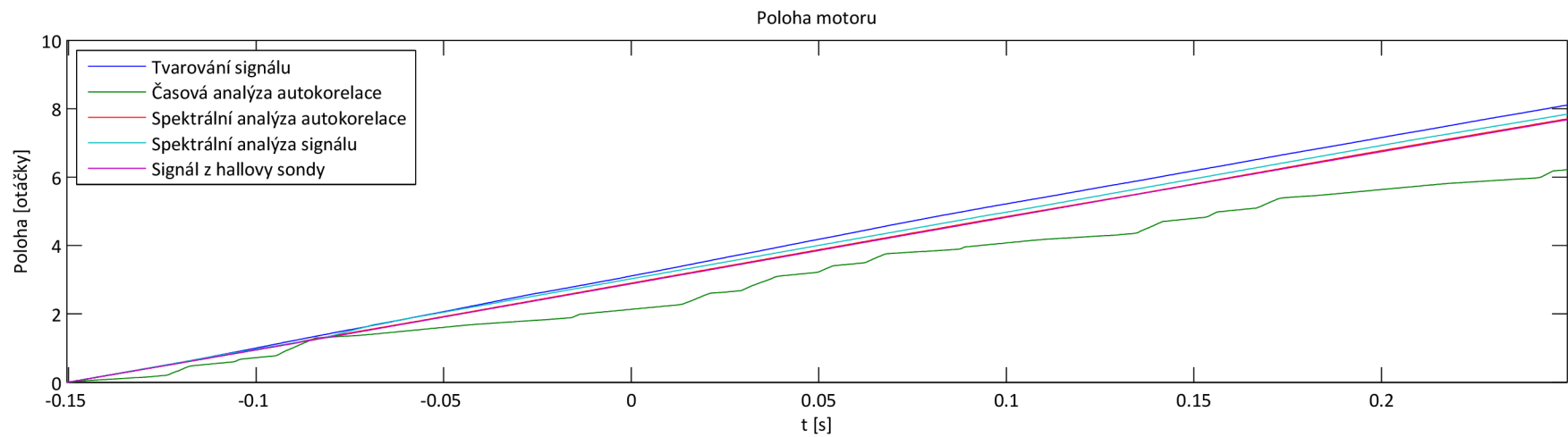
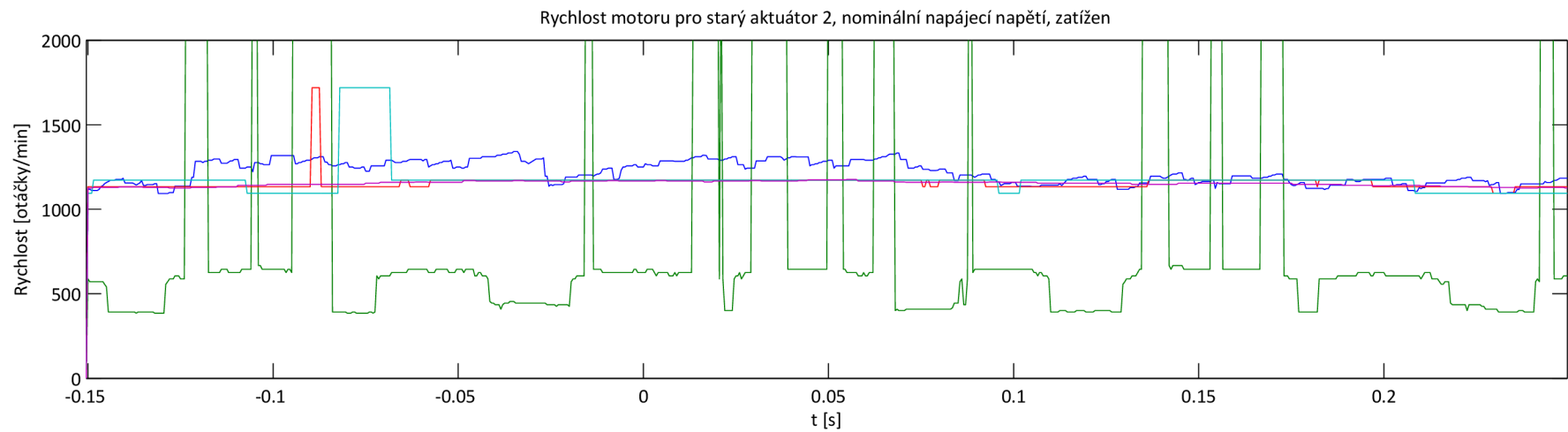
Obr. A.2: Nový aktuátor, nominální napájecí napětí, zatížen



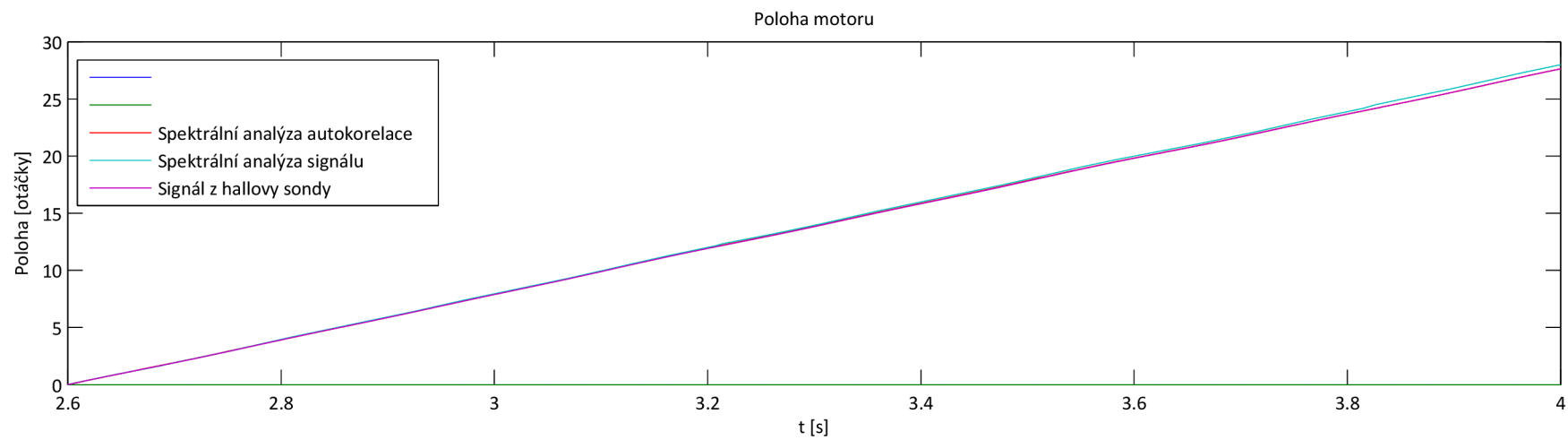
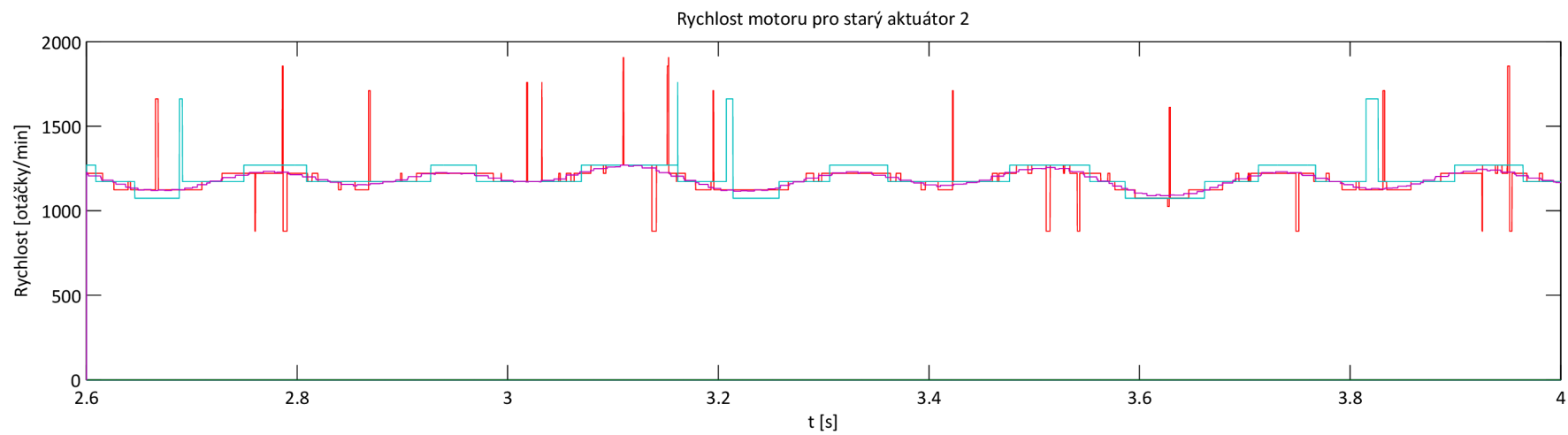
19



Obr. A.3: Starý aktuátor, nominální napájecí napětí, nezatížen

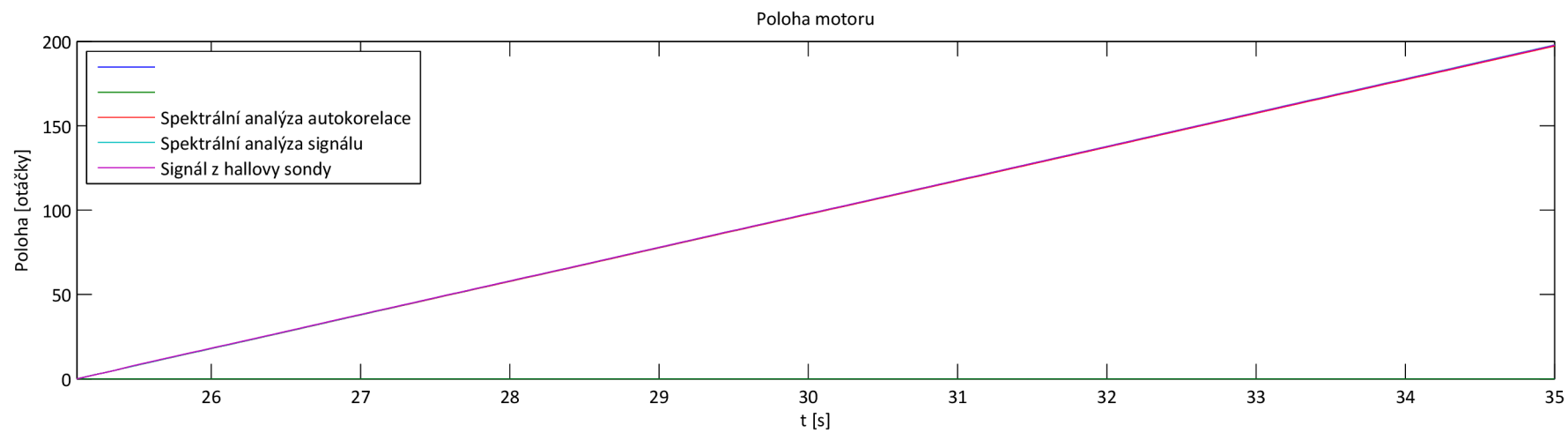
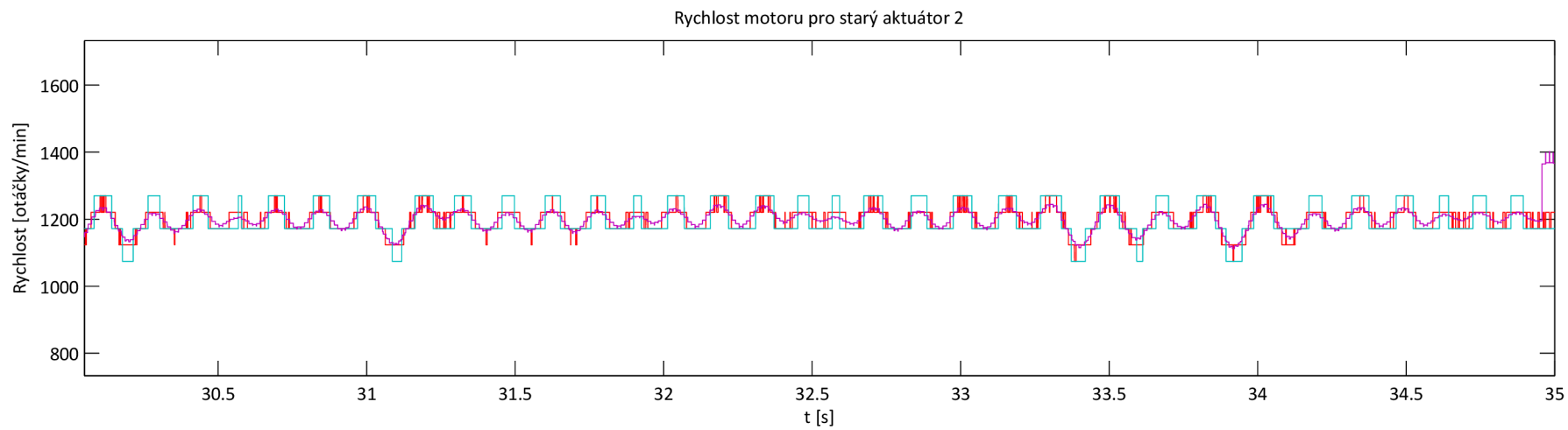


Obr. A.4: Starý aktuátor, nominální napájecí napětí, zatížen



53

Obr. A.5: Starý aktuátor, delší signál



54

Obr. A.6: Starý aktuátor, delší signál

## B POUŽITÉ PŘÍSTROJE

Pro demonstraci problematiky metody detekce komutačních pulzů v první části práce byly zachyceny průběhy signálů na obrázcích 2.3, 2.6 a 2.7. Pro toto měření ve firmě Honeywell byly použity následující přístroje, měřeno bylo na aktuátoru SmartAct s výrobním číslem 50008457.

- Osciloskop Tektronix TDS 3034B, digitální, 4 kanálový, výr. č. 0016–0099, ev. č. HIM 200005
- Napájecí zdroj střídavý, Trennstelltrafo LTS 606 TTW, 230 V (250 V/6 A), ev. č. DM1 202406
- Napájecí zdroj stejnosměrný, TTI Thurlby thandar instruments, 32 V/2 A, PL32 QMT
- Dekáda odporová, Time Electronics Ltd, Decade Resistance Model 1034 (1 Watt Resistor), výr. č. 1054603, ev. č. DHM 200074
- Dekáda kapacitní, Time Electronics Ltd, Capacitance Box 1071, výr. č. 2101603, ev. č. DHM 200075

K měření sady signálů pro testování metod zpracování signálu byla použita stejná deska plošného spoje aktuátoru s výr. č. 50008457, u níž byly vyměňovány motory. U některých měření pak byla použita odlišná převodovka. K měření byly použity následující přístroje:

- Osciloskop Agilent Technologies MSO 7054A, čtyřkanálový, výr. č. 16000164
- Rezistor 9,7 k $\Omega$ , kapacitor 15 nF, drátové provedení
- Momentový tester (prášková magnetická brzda, jinak také test bench, testovací lavice), Magneta D–Aerzen, typ 14.512.02.12, č. 116010
- Měřidlo Nm a úhlu otočení, Lorenz Messtechnik GmbH, DD2002, sér. č. 9276
- Napájecí zdroj střídavý, Trennstelltrafo LTS 606 TTW, 230 V (250 V/6 A), ev. č. DM1 202406
- Transformátor 230 na 24 V, Honeywell
- Napájecí zdroj stejnosměrný, TTI Thurlby thandar instruments, 32 V/2 A, PL32 QMT
- Napájecí zdroj stejnosměrný Manson SDP 2405, ev. č. DHM 201516
- Multimetr digitální, Fluke 175
- Měřicí karta National Instruments USB-6009 CARD



## C OBSAH PŘILOŽENÉHO CD MÉDIA

Přiložené CD médium obsahuje následující složky:

- *El\_verze\_prace* – elektronická verze práce ve formátu PDF
- *Graficke\_vysledky* – přiložené a ostatní grafické výsledky provedených simulací, ve formátu MATLABU \*.fig.
- *MATLAB\_Zdroj\_kody\_namerena\_data* – Zdrojové soubory simulace v MATLABu (psány ve verzi R2010a, měly by být přenositelné na jiné verze, doplněk Signal Processing Toolbox) tak, jak jsou popsány v kapitole 3.5. Zdrojový kód je patřičně komentován. V podsložkách *labview-mereni*, *novy-aktuator-1*, *novy-aktuator-2*, *stary-aktuator-1* a *stary-aktuator-2* pak datové soubory ve formátu CSV nebo TXT s naměřenými signály.