



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANIC

TESTOVÁNÍ PARAMETRŮ KROKOVÝCH MOTORŮ PŘI
RŮZNÝCH REŽIMECH MIKROKROKOVÁNÍ
TESTING PARAMETERS OF STEPPER MOTORS AT DIFFERENT MICROSTEPPING MODE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB MÜLLER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID KLIMEŠ

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Müller

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Testování parametrů krokových motorů při různých režimech mikrokrokování

v anglickém jazyce:

Testing parameters of stepper motors at different microstepping mode

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem testovacího přípravku pro testování parametrů krokových motorů používaných v robotických systémech.

Následně na sestaveném přípravku bude provedeno základní ověření funkce krokových motorů-ověření teoretických principů.

Dalším krokem bude měření přesnosti použitých motorů při různých režimech řízení a mikrokrokování.

Cíle bakalářské práce:

- návrh a realizace standu, který bude využit při měření statických a dynamických parametrů krokových motorů
- měření přesnosti mikrokrokování
- měření linearity polohování při krokování motoru (při různě nastaveném mikrokrokování)
- ztráta kroku v závislosti na budících frekvencích
- testování dynamiky rozběhu krokového motoru

Seznam odborné literatury:

P.P. Acarnley: Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice

Prof. Ing. Jiří Skalický , CSc. : Elektrické servopohony

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Klimeš

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a sestavením testovacího zařízení, které umožňuje měření základních parametrů krokových motorů. Úvodní část je věnována rešerši o principu fungování hybridního krokového motoru. K analýze motoru bylo využito simulace matematického modelu s reálnými parametry v prostředí Matlab/Simulink. V další části je uveden návrh mechanické a elektronické podoby testovacího zařízení s popisem použitých komponent. Poslední část práce je zaměřena na měření budících proudů a na měření ztrát kroků při různých režimech řízení a mikro-krokování.

Abstract

This thesis deals with design and construction of test equipment that allows measurements of basic parameters of stepper motors. The first part is devoted to the search about the principle of operation of the hybrid stepper motor. For the analysis engine has been used a mathematical simulation model with real parameters in Matlab/Simulink. The next section is the design of mechanical and electronic form of the test facility with a description of the components used. The last part of this work is focused on measuring the excitation currents and measuring loss of steps at various control modes and microstepping.

Klíčová slova

Krokový motor, rotační snímač polohy, Real-Time Windows Target, simulace, měření proudu, mikro-krokování

Keywords

Stepper motor, encoder, Real-Time Windows Target, simulation, current measurement, microstepping

Bibliografická citace mé práce:

MÚLLER, J. *Testování parametrů krokových motorů při různých režimech mikrokrokování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Klimeš.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma TESTOVÁNÍ PARMETRŮ KROKOVÝCH MOTORŮ PŘI RŮZNÝCH REŽIMECH MIKROKROKOVÁNÍ 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.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Klimešovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	7
2 KROKOVÝ MOTOR	8
2.1 ÚVOD KE KROKOVÝM MOTORŮM	8
2.2 KONSTRUKCE	8
2.2.1 PRŮBĚH KROKŮ U KM	9
2.3 ŘÍZENÍ KM	10
2.3.1 UNIPOLÁRNÍ A BIPOLÁRNÍ KM	10
2.3.2 REŽIM MIKRO-KROKOVÁNÍ	11
2.4 MATEMATICKÝ MODEL HYBRIDNÍHO KM	11
2.5 MATEMATICKÝ MODEL KM V SIMULINKU	13
3 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ	15
3.1 POŽADAVKY NA TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ	15
3.1.1 3D NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ Z POHLEDU MECHANIKY	15
3.1.2 NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ Z POHLEDU ELEKTRONIKY	16
3.2 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH KOMPONENT	16
3.2.1 SNÍMAČ ROTAČNÍ POLOHY NEBOLI ENKODÉR	16
3.2.2 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA KROKOVÉHO MOTORU M542	17
3.2.3 KROKOVÝ MOTOR	18
3.2.4 PROUDOVÉ ČIDLO	19
3.3 REÁLNY POHLED NA CELÉ TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ	21
4 PŘIPOJENÍ A ŘÍZENÍ TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ Z PROSTŘEDÍ MATLAB-SIMULINK ..	22
4.1 ZAPOJENÍ KARTY MF624	22
4.2 ŘÍZENÍ POMOCÍ SIMULINKU A RTWT	22
5 MĚŘENÍ PRŮBĚHU BUDÍCÍCH PROUDŮ	24
5.1 VÝPOČET ZESÍLENÍ ČIDLA PROUDU	24
5.2 BUDÍCÍ PROUD OBOU FÁZÍ	25
5.3 VLIV ZVYŠOVÁNÍ MIKRO-KROKOVÁNÍ NA BUDÍCÍ PROUD	26
5.4 SATURACE MĚŘENÉHO PROUDU	29
6 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK MOTORU	30
6.1 MĚŘENÍ LINEARITY POLOHOVÁNÍ	30
6.1.1 CÍL MĚŘENÍ	30
6.1.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ	30
6.2 ZTRÁTA KROKŮ V ZÁVISLOSTI NA SKOKOVÉ ZMĚNĚ BUDÍCÍ FREKVENCE	32
6.2.1 CÍL MĚŘENÍ	32
6.2.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ	32
6.2.3 MĚŘENÍ PRO 400 KROKŮ/OTÁČKU	33
6.2.4 MĚŘENÍ PRO 1600 KROKŮ/OTÁČKU	34
6.3 ZTRÁTA KROKŮ PŘI KONSTANTNÍ RYCHLOSTI	35
6.3.1 CÍL MĚŘENÍ	35

6.3.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ PŘI MIKRO-KROKOVÁNÍ 1600 KROKŮ/OTÁČKU	35
6.3.3 MĚŘENÍ PŘI MIKRO-KROKOVÁNÍ 800 KROKŮ/OTÁČKU.....	37
6.4 TESTOVÁNÍ DYNAMIKY ROZBĚHU KM.....	38
6.4.1 CÍL MĚŘENÍ	38
6.4.2 IDEÁLNÍ ROZBĚH KM POMOCÍ NÁBĚŽNÉ RAMPY	38
ZÁVĚR.....	40
LITERATURA	41
PŘÍLOHY	45

1 ÚVOD

Krokové motory mají velkého využití v robotických a dalších polohovacích systémech. Hlavní předností je jednoduchý a cenově dostupný motor, pro který není potřeba zpětnovazebního řízení. Avšak při použití bez zpětné vazby musí inženýr důkladně znát chování daného motoru z pohledu ztráty kroků. Jednoduchý budicí systém může být sestavený z několika tranzistorů.

Cílem této práce je především sestavit testovací zařízení, které bude nadále možné využít pro testování různých typů krokových motorů. Toto zařízení bude možné rozšířit o další komponenty, díky kterým by bylo možné měřit další parametry krokových motorů. Například připojení dynamometru by umožnilo získávat informace o momentech krokových motorů při různých režimech řízení.

Tato práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická rešeršní část se zabývá obecným pohledem na krokové motory, způsob řízení a mikro-krokování. Dále je sestaven matematický model, který je simulován v prostředí Matlab/Simulink, pro demonstraci funkčnosti krokového motoru.

Další část se zabývá samotným návrhem mechanické a elektronické stránky testovacího zařízení. Je vytvořen 3D model celé sestavy a z něj pak kompletní technická dokumentace pro výrobu součástí potřebných pro toto zařízení. V této kapitole jsou nadále popsány všechny komponenty, kterých je využito.

Poslední část je zaměřena na vlastní měření elektrických a mechanických parametrů. Pro zjištění budicích proudů je využito čidla proudu (LEM). Hlavním cílem měření mechanických parametrů je zjišťování závislostí ztrát kroků při různých režimech řízení a mikro-krokování.

2 KROKOVÝ MOTOR

2.1 Úvod ke krokovým motorům

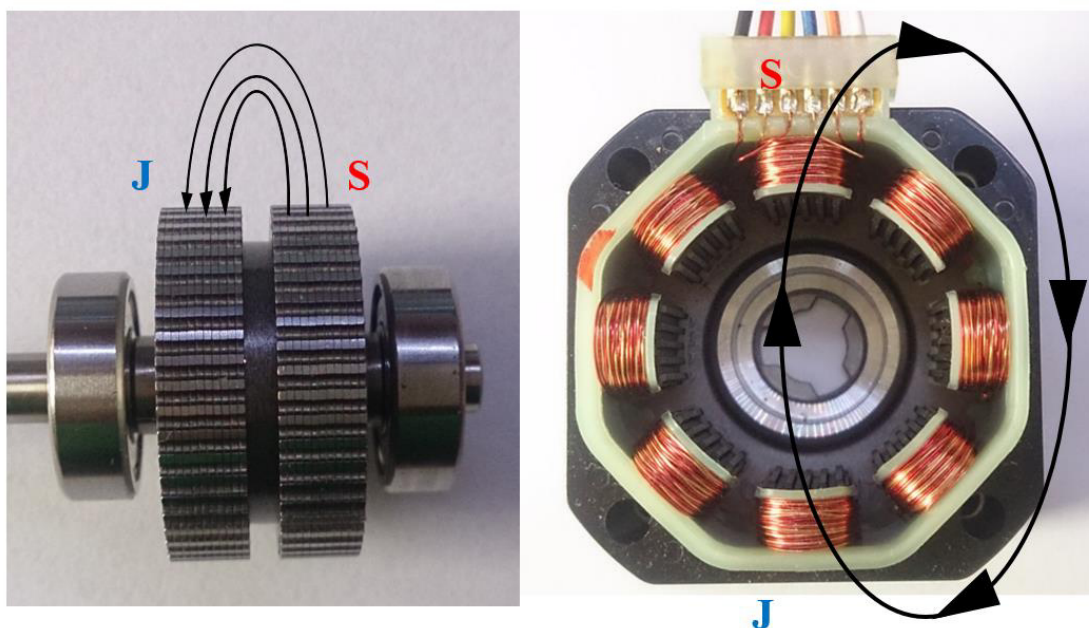
Krokový motor (KM) je znám už desítky let. Velkého rozmachu dosáhl s rozvojem polovodičové techniky pro spínání stejnosměrných proudů. Jedná se tedy o stejnosměrný stroj. Jak již název napovídá, typickým rysem je pootáčení hřídele po jednotlivých krocích. Počet kroků na jednu otáčku je dán konstrukcí stroje a způsobem řízení. Tyto motory lze efektivně spojit s mikropočítačem, který nám umožňuje následné řízení mechanického pohybu. Uplatnění nacházejí tam, kde není potřeba zpětné vazby pro nastavení polohy. Pouze se jen přičítají řídicí pulsy, které odpovídají přesně danému posuvu. Pro přesnější a spolehlivější aplikace se dají použít i se zpětnovazebním řízením. [1]

Tyto motory se vyrábějí ve třech základních provedeních. To jsou: s variabilní reluktancí, s permanentním magnetem a hybridní. V této práci se budeme dále zabývat jen posledním hybridním typem, který bude využit i pro všechna měření. Práce se nebude zabývat detailními fyzikálními principy motoru. [1]

2.2 Konstrukce

Hybridní motor je vytvořen ze dvou hlavních částí.

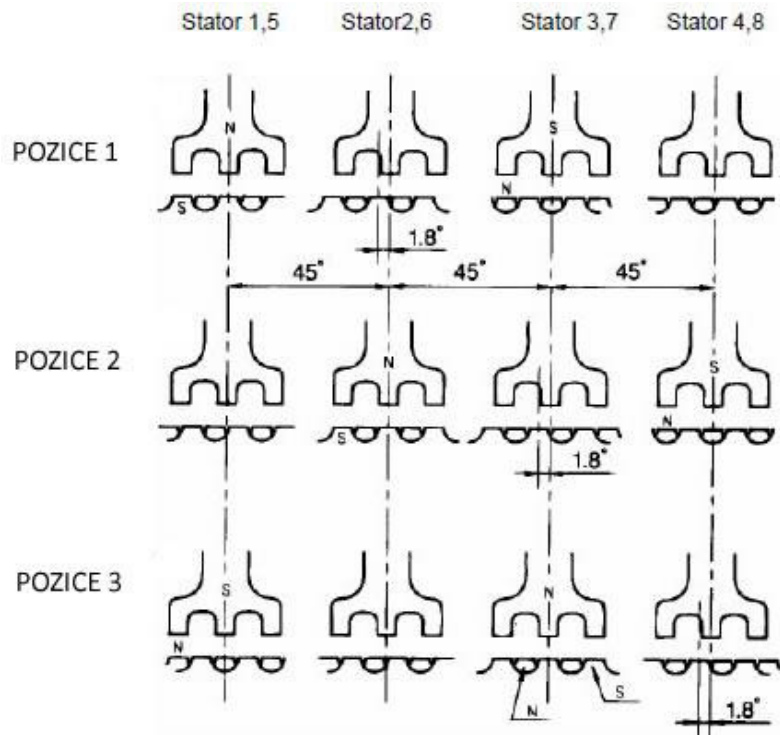
1. Stator, který nese pólové dvojice s vyčnívajícími čtyřiceti zuby. Na každém pólu je vinutí vodičů, které umožňuje vést proud oběma směry a tím měnit polaritu.
2. Rotor se skládá ze dvou válců s ozubením. Běžně má 50 zubů. Uvnitř je magnet, nejčastěji z neodymu. Oba válce jsou pootočený tak, aby zuby jednoho odpovídaly drážkám na druhém - detail na obrázku (2.1 vlevo). Jeden válec tvoří severní a druhý jižní magnetický pól. Na obrázku (2.1) jsou znázorněny magnetické siločáry pro uvedený severní a jižní magnetický pól. [2]



Obrázek 2.1 Znázornění rotorového (vlevo) a statorového (vpravo) magnetického toku

2.2.1 Průběh kroků u KM

Na dalším obrázku bude vysvětlen princip funkčnosti motoru.



Obrázek 2.2 Průběh kroků u hybridního krokového motoru. Převzato z [2]

Obrázek (2.2) znázorňuje rozložení statorových pólů do roviny. Číslování 1,5 značí vždy dva protilehlé póly.

V 1. pozici je ve statorových pólech 1 a 5 proudem vytvořeno magnetické pole, proti kterému se přesně srovnaly zuby jižního pólu rotoru. Zároveň zuby na statoru 3,7 jsou magnetizovány druhou fází a tvoří jižní pól. Proti nim se srovnaly zuby severního pólu rotoru. [2]

Ve 2. pozici jsou buzeny póly 2,6 a 4,8. Jak vidíme na obrázku (2.2), rotor udělal 1 krok a posunul se o polovinu zubu, což ve většině případů odpovídá 1,8°. Toto konstrukční řešení zajistí, že postupným buzením je vytvořeno rotující magnetické pole statoru, které zapříčiní rotační pohyb rotoru v požadovaném směru. [2]

Výpočet velikosti natočení jednoho kroku:

$$\theta = \frac{360^\circ}{2p \cdot z \cdot m} \quad (2.1)$$

Kde:

2p – počet pólů rotoru

z – počet zubů rotoru

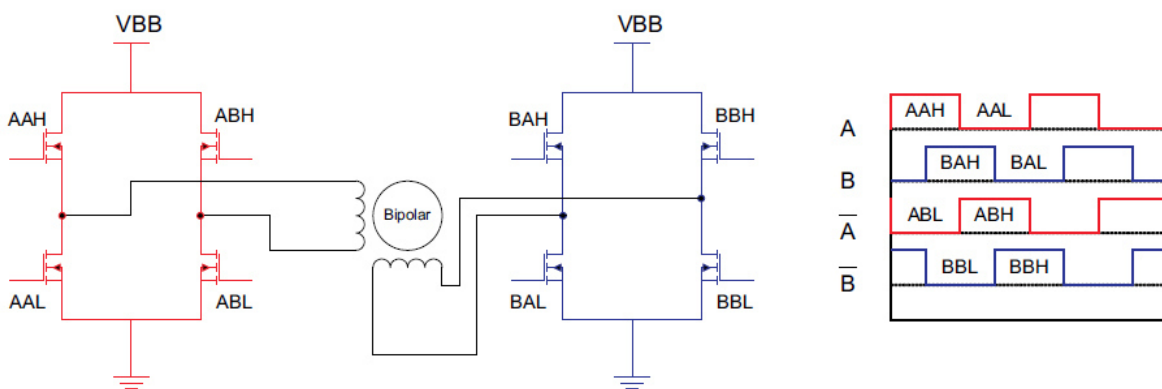
m – počet fází

[2]

2.3 Řízení KM

Krokový motor má vinutí, kde fáze lze nahradit obvodem, ve kterém je definovaná indukčnost a odpor vinutí. Do fázi se pomocí tranzistorů zapíná a vypíná proud. Jak je znázorněno na obrázku (2.3). Sepnutím jedné fáze se motor natočí do zadržovací polohy. Vypnutím první a zapnutím druhé fáze se posune do další zadržovací polohy. Tomuto spínání proudů se říká puls, který odpovídá pootočení o přesně daný úhel. Řídící sekvence vstupních pulsů poté vytvoří trvalý rotační pohyb. Typickým a nežádoucím rysem bývá přechodový překmit a rezonance. [3]

Pokud je stále napájena jedna fáze, rotor setrvává v určitém natočení a vytváří přídržný moment. Tohoto lze využít pro udržování aplikace v určité poloze. Další výhodou je, že pokud točící motor bude zatížen příliš velkým momentem a dojde k zastavení, tak nedojde ke shoření satorového vinutí. Motor se totiž řídí konstantním proudem, takže nedochází k nárůstu proudu se zatížením jako u některých elektrických strojů. [3]



Obrázek 2.3 Schéma buzení bipolárního motoru (vlevo) a řídicí sekvence. Převzato z [10]

2.3.1 Unipolární a bipolární KM

Unipolární motor umí vést proud pouze jedním směrem. Má 6 vyvedených drátů s tím, že při navíjení se začne například od A a v polovině se vyvede ven. To samé se udělá z druhé strany od -A. Tento zdvojený vývod se nazývá společná zem. Jedna fáze je navinuta kolem každého druhého satorového pólu. Proud poté teče vždy jen jednou fází do motoru a společnou zemí ven. Výhodou je jednodušší zapojení, ale nižší krouticí moment, protože je vždy buzena pouze jedna cívka. [3] [4]

Naopak bipolární, jak je vidno na obrázku (2.3), má pouze 4 vyvedené dráty a proud může vést oběma směry. Jsou buzeny vždy dvě protilehlé cívky, čímž se dosahuje dvojnásobného momentu, avšak za cenu vyššího odběru proudu. Ve většině případů se pro bipolární budiče používá H-můstků. Na každou fázi jsou zapotřebí 4 tranzistory. [3] [4]

2.3.2 Režim mikro-krokování

Mikro-krokování může být použito u jakéhokoliv novějšího typu KM. Touto funkcí rozumíme schopnost řídicí jednotky dodávat v určitých poměrech proud do fází a donutit tak motor dostávat se mezi přirozené polohy plného kroku. Pokud si prohlédneme aktuální nabídky [14] zjistíme, že lze dosáhnout až hodnoty 102400 kroků na otáčku. Tomu odpovídá pootočení o $0,003515^\circ$ na jeden řídicí puls. Tohoto lze využít, požadujeme-li, aby se motor pootáčel po co nejmenších inkrementech. Další výhodou je, že se vyhladí průběh, zmizí překmity a přechodové rezonance. Tím se i sníží hlučnost motoru. [3] [4]

2.4 Matematický model hybridního KM

Dvoufázový hybridní krokový motor je popsán následujícími rovnicemi:

Při otáčení rotoru úhlovou rychlostí ω se ve vinutí statoru indukují napětí u_i .

$$u_i = p \cdot \omega \cdot n \cdot \Phi_M \cdot \sin(p \cdot \varphi) \quad (2.2)$$

Podle obrázku (2.5) poté můžeme složit napěťovou rovnici pro fázi A

$$U - R \cdot i_A - L \cdot \frac{di_A}{dt} - M \cdot \frac{di_B}{dt} - p \cdot \omega \cdot n \cdot \Phi_M \cdot \sin(p \cdot \varphi) = 0 \quad (2.3)$$

Člen $M \cdot \frac{di_B}{dt}$ představuje napětí vzájemnou indukčností fází.

Pro fázi B platí stejná rovnice, jen indukované napětí je ovlivněno úhlem mezi statorovými póly λ

$$U - R \cdot i_B - L \cdot \frac{di_B}{dt} - M \cdot \frac{di_A}{dt} - p \cdot \omega \cdot n \cdot \Phi_M \cdot \sin(p \cdot (\varphi - \lambda)) = 0 \quad (2.4)$$

Působením proudu obou fází $i_A + i_B$ a magnetického toku se vytvoří moment na hřídeli m_i

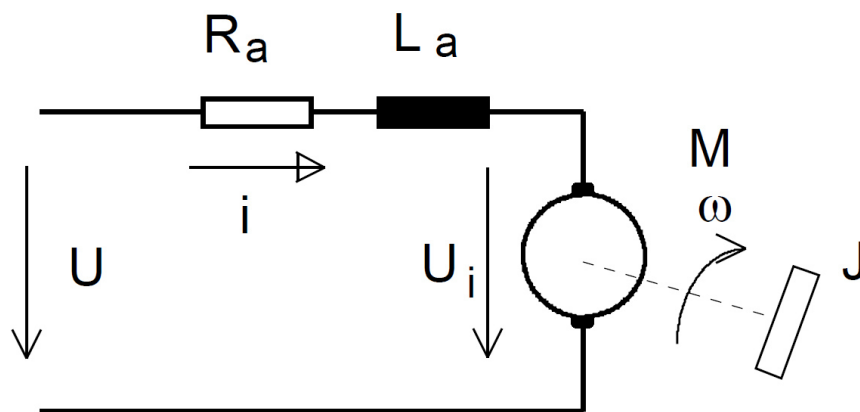
$$m_i = p \cdot n \cdot \Phi_M \cdot \{i_A \sin(p \cdot \varphi) + i_B \cdot \sin[p \cdot (\varphi - \lambda)]\} \quad (2.5)$$

Proti vytvořenému momentu m_i působí zátěžný moment m_z , moment setrvačnosti J , který závisí na úhlovém zrychlení a koeficient viskózního tření B , závislý na úhlové rychlosti.

Momentová rovnice má poté následující tvar:

$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + B \cdot \frac{d\varphi}{dt} + m_z - p \cdot n \cdot \Phi_M \cdot \{i_A \sin(p \cdot \varphi) + i_B \cdot \sin[p \cdot (\varphi - \lambda)]\} = 0 \quad (2.6)$$

Všechny rovnice čerpány z [16]



Obrázek 2.4 Schéma motoru včetně elektromechanické vazby [12]

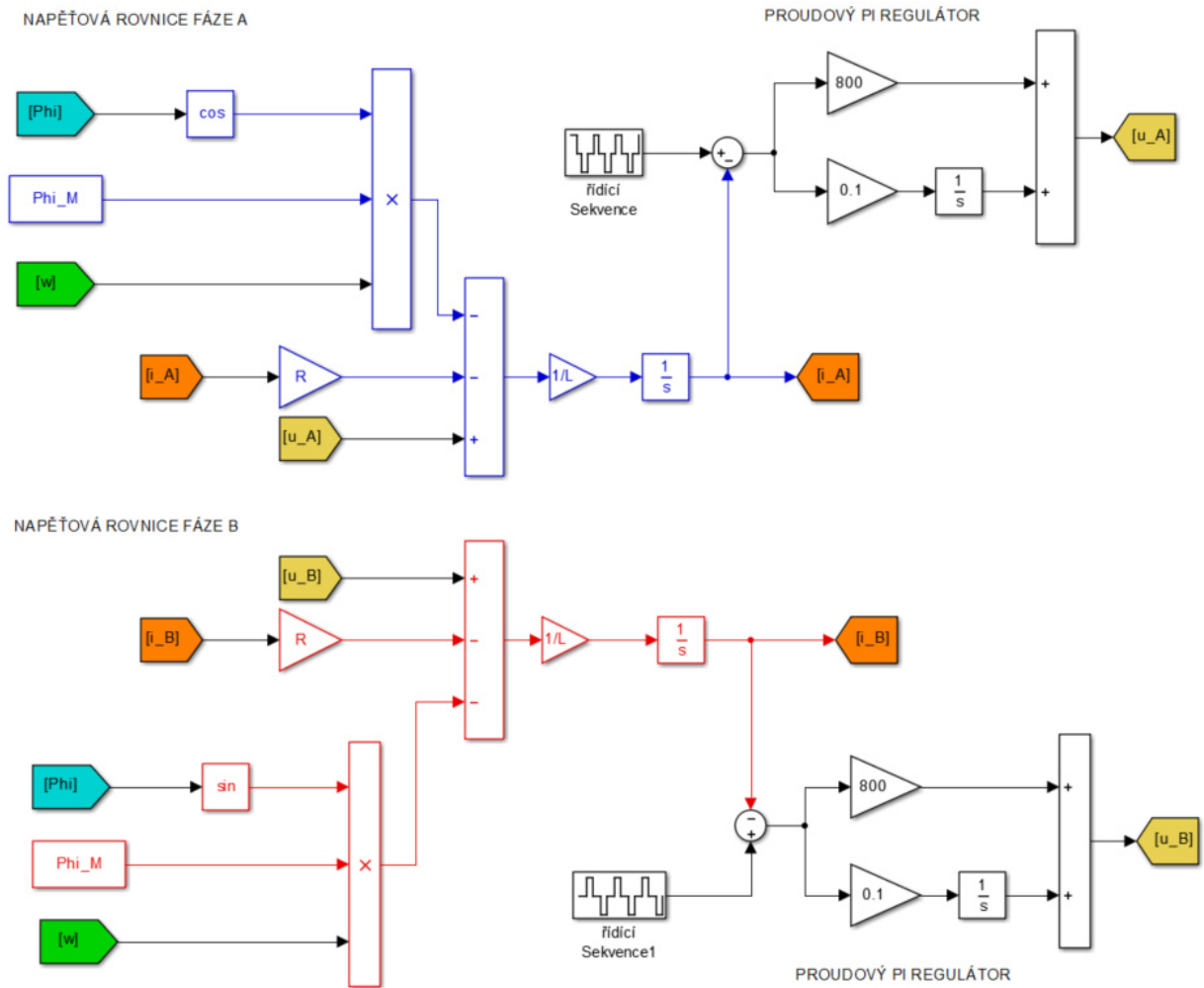
Přehled proměnný použitých v kapitole (2.4)

- U svorkové napětí motoru
- u_i indukované napětí
- $2p$ počet magnetických pólových dvojic rotoru
- n počet závitů
- φ úhlové natočení
- ω úhlová rychlost
- ϕ_M magnetický tok permanentním magnetem
- i proud
- R odpor vinutí každé fáze
- L vlastní indukčnost vinutí každé fáze
- M vzájemná indukčnost
- λ úhel mezi statorovými póly (u 4 – pólového stroje je $\lambda = 45^\circ$)
- J moment setrvačnosti rotujících částí stroje
- B koeficient viskózního tření
- m_i indukovaný moment
- m_z zátěžný moment

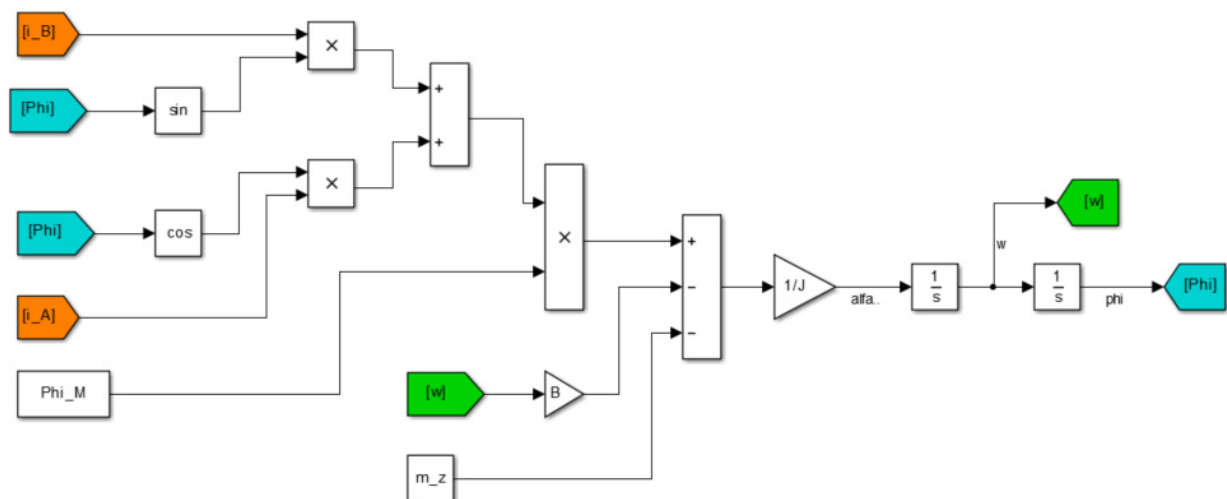
2.5 Matematický model KM v Simulinku

Model slouží k demonstraci funkčnosti matematického modelu hybridního krokového motoru. Model nelze srovnávat s naměřenými daty z důvodu zjednodušení modelu.

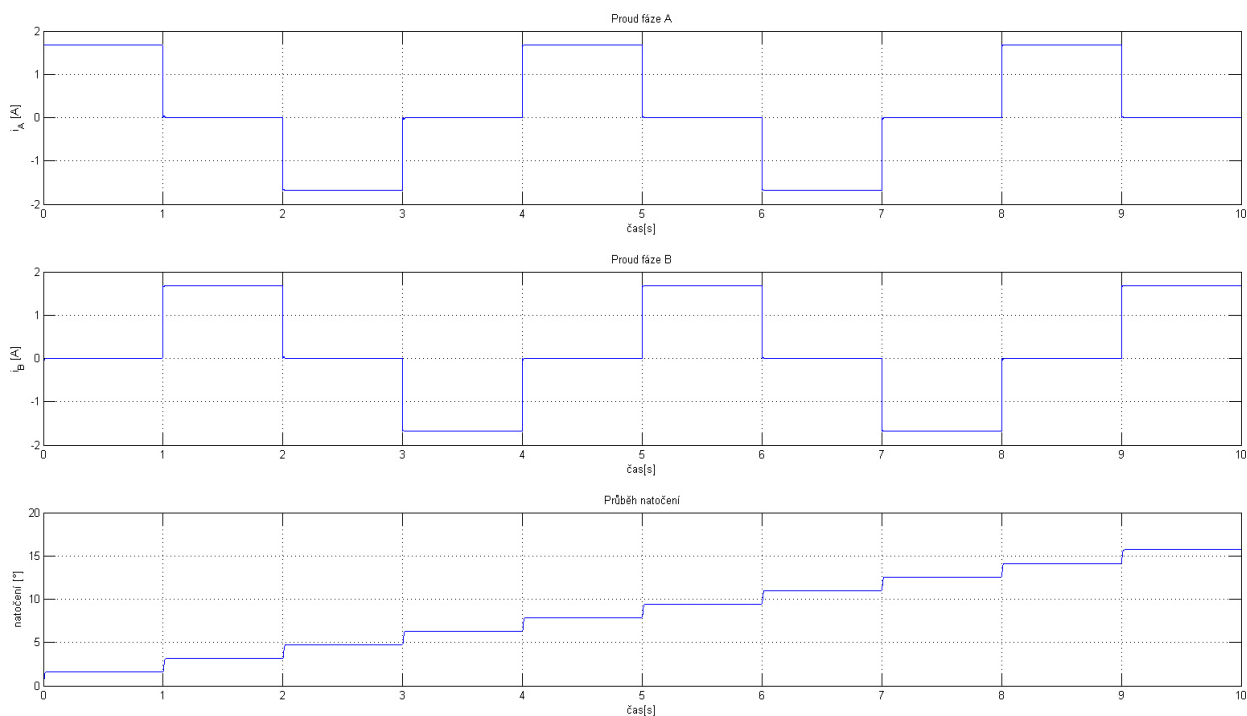
Pro simulování motoru jsou použity rovnice (2.3), (2.4), (2.6). Pro zjednodušení modelu se neuvažuje vzájemná indukčnost a je použitý 4 pólový stroj. Obdélkový budicí proud je regulovaný pomocí PI regulátoru skrze napětí.



Obrázek 2.5 Schéma napěťových rovnic KM



Obrázek 2.6 Schéma momentové rovnice KM



Obrázek 2.7 Gráf budících proudů a průběhu natočení

Simulace proběhla s následujícími hodnotami [7]

$$\begin{aligned}
 R &= 1,65 \text{ } [\Omega] & m_z &= 0,5 \text{ } [\text{Nm}] \\
 J &= 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ } [\text{kg m}^2] & i &= 1,68 \text{ } [\text{A}] \\
 L &= 0,036 \text{ } [\text{H}]
 \end{aligned}$$

Konstanta $\text{Phi_M} = 0,25 \text{ } [\text{Vs}^{-1}]$ v modelu se dá chápat, jako konstanta stroje.

Koeficient viskózního tření byl odhadnut na základě vývoje průběhů $B = 0,0025 \text{ } [\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}]$

Můžeme pozorovat, že u natočení nedochází k žádným překmitům jako v reálném případě. To je zapříčiněno nastavenými parametry. Soustava je poté dostatečně utlumená.

3 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

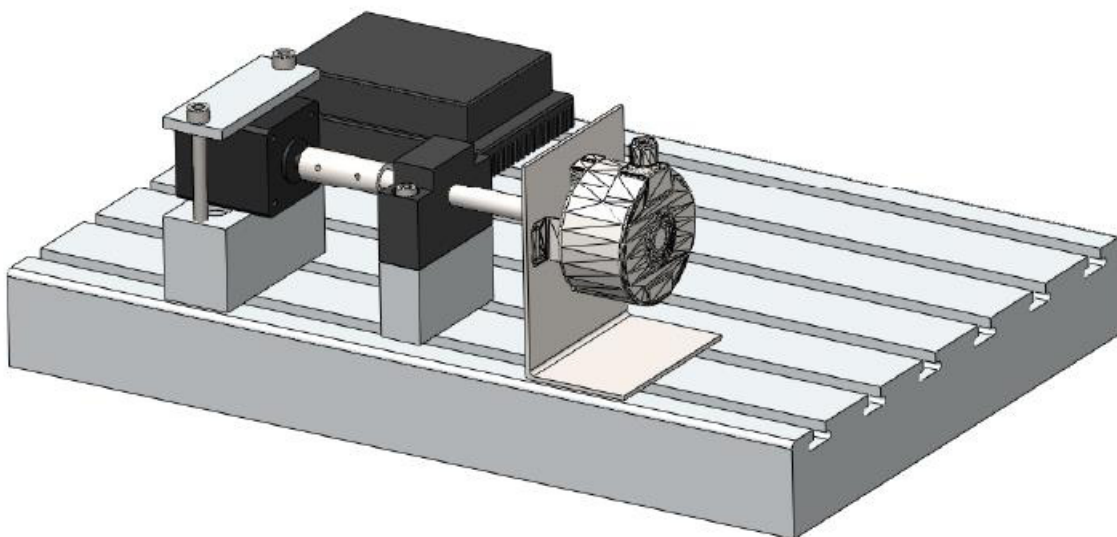
Motivací celé realizace testovací jednotky bylo vytvoření zařízení k testování parametrů KM tak, aby se mohlo ověřit, zdali se tyto parametry shodují s těmi uvedenými od výrobce.

3.1 Požadavky na testovací zařízení

Hlavním požadavkem bylo vytvořit jednoduché, kompaktní a cenově dostupné měřící zařízení. K přesnému měření polohovacích charakteristik motoru bylo nutné vybrat ne úplně standartní enkodér s vysokým rozlišením. Motor a enkodér bylo potřeba umístit do rovnoběžné polohy tak, aby nedocházelo k vyosení. Dále bylo žádoucí zajistit dostatečnou tuhost, eliminovat obvodové házení a co nejvíce potlačit vibrace. K tomu jsou použity ložiskové domky, pod které byly vyrobeny podložky, tak aby bylo dosaženo určité výšky. Pod motor je vyrobena podložka se závitovými dírami aby bylo možné motor pevně ze shora upevnit pomocí profilu a šroubů. Všechny komponenty jsou umístěny na hliníkovém profilu s drážky pro uchycení. Další místo je využito pro umístění řídicí jednotky a svorkovnic karty MF624. Zbýlý prostor je plánován pro připojení libovolné zátěže. Například použití dynamometru pro zjišťování chování při určitém zátěžném momentu. Další úvahy byly nad připojením řemenu pomocí řemenic a zkoumání chování motoru v závislosti na stavu daného řemenu.

3.1.1 3D návrh testovacího zařízení z pohledu mechaniky

Pro vytvoření byl použit software SolidWorks¹. Model má pouze informativní charakter pro naplánování reálných rozměrů. Na základě modelu byly vytvořeny výkresy komponent, které bylo potřeba vyrobit. Původní verze obsahovala delší hřídel a dva ložiskové domky. Avšak tato varianta měla moc velký moment setrvačnosti a tím docházelo k ovlivňování výsledků měření.

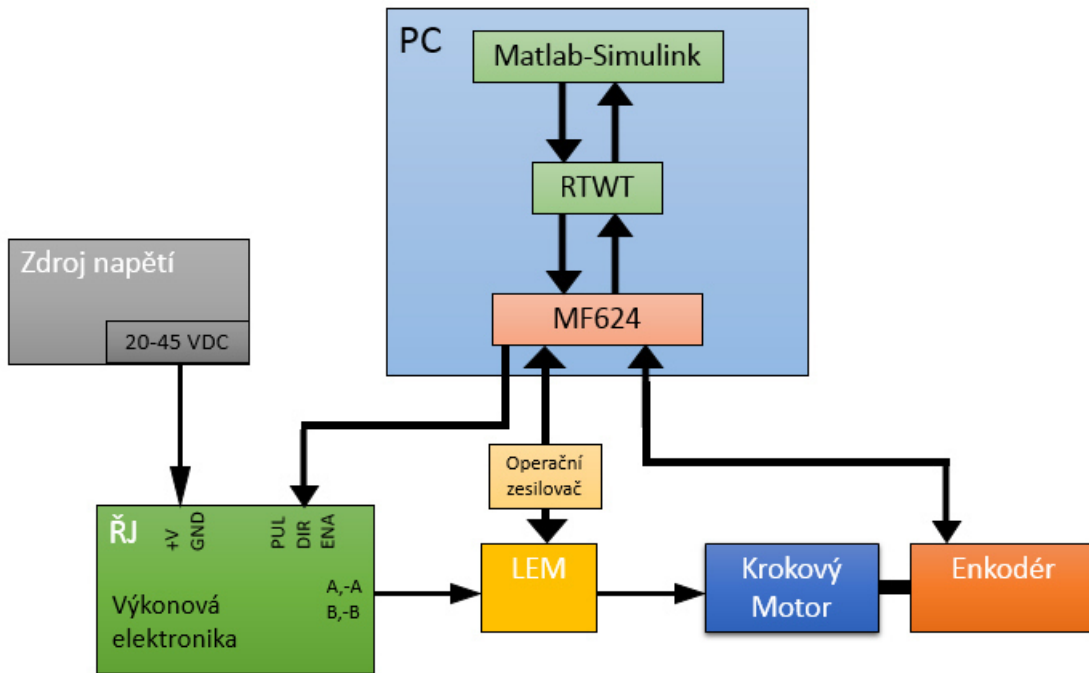


Obrázek 3.1 3D model testovacího zařízení

¹ Použitá verze SolidWorks 2012

3.1.2 Návrh testovacího zařízení z pohledu elektroniky

Zapojení řídicí části, výkonové a ostatní elektroniky je patrné z obrázku (3.1). Řídicí jednotka je napájena laboratorním zdrojem napětí. Operační zesilovač čidla proudu a enkodér jsou napájeni z karty MF624. Proud tekoucí do krokového motoru je snímán čidlem proudu (LEM). Výstupem čidla je analogový signál, který je poté přiveden přes zesilovač na analogový vstup karty MF624.



Obrázek 3.2 Schéma celkového zapojení elektroniky zařízení

3.2 Charakteristika použitých komponent

3.2.1 Snímač rotační polohy neboli enkodér

Všechny polohovací aplikace ve strojírenství potřebují přesnou zpětnou informaci o aktuální poloze. Rotační snímače polohy převádějí mechanický pohyb do digitální formy a vyznačují se konstantní přesností v celém měřeném rozsahu. [5]

Pro naše zařízení je potřeba využít snímač rotační polohy k tomu, abychom mohli přesně měřit průběh natočení a chování motoru při překmitech. Dále je potřeba dosáhnout vysokého rozlišení k zobrazení ztracených kroků.

Proto byl vybrán enkodér od firmy SICK. Jedná se o programovatelný inkrementální enkodér s vysokým rozlišením. Při všech měření je nastaven na 65 000 impulsů. Toto vysoké rozlišení jsme zvolili, abychom získali vysokou přesnost při překmitech s dobrou informací o průběhů kroků. Inkrementální rotační snímače dodávají za každou otáčku přesně definovaný počet impulsů. Snímač nemá absolutní přiřazení signálu k poloze. Je zde ale možnost nastavení indexovacího pulzu, který určí absolutní polohu.

Rozlišení je možné nastavit po připojení k pc pomocí programátoru a softwaru dostupného z [15]

Parametry enkodéru:

- Rozlišení 1 – 65 536 impulsů na otáčku
- Přesnost při více jak 10^3 pulsů $\pm 0,002^\circ$

[6]

Kabeláž byla připájena podle následující tabulky (3.1)

Tabulka 3.1 Zapojení pinů enkodéru a přiřazených signálů [6]

PIN ENKODÉRU	SIGNÁL	VODIČ	PIN SBĚRNICE X2
1	SIN -	modrá	IRC0B-
8	SIN +	oranžová/bílá	IRC0B+
3	Z	hnědá	IRC0I+
4	Z -	hnědá/bílá	IRC0I-
5	COS +	zelená	IRC0A+
6	COS -	zelená/bílá	IRCA-
10	GND	modrá/bílá	GND
12	+U	oranžová	+5V

3.2.2 Řídící jednotka krokového motoru M542

Jedná se o běžně používanou, komerční řídicí jednotku, která umožňuje vysoké mikro-krokování. V tomto režimu jednotky nastavují amplitudu proudu (peak) na hodnotu 1,4 násobku střední kvadratické hodnoty proudu (RMS). KM jsou dimenzovány tak, aby snesly toto navýšení.

Parametry:

- Napájecí napětí 20-45 VDC
- Vstupní frekvence 0-300 kHz
- Mikro-krokování 400-25 600 kroků/otáčku (po dvojnásobcích)
- Omezení proudu 1-4,2 A

Popis přepínačů SW1-SW8:

- SW1-SW3 – kombinacemi on/off se nastavuje úroveň omezení proudu
- SW4 – možnost nastavení polovičního proudu při zastavení motoru
- SW5-SW8 – kombinacemi on/off se nastavuje velikost mikro-krokování

Při vypnutí SW4 se proud automaticky redukuje na polovinu jmenovitého proudu sekundu po posledním pulsu. Toto snižuje zahřívání motoru. Pokud je SW4 zapnut, pak po zastavení motoru prochází vinutím celý jmenovitý proud. Toho lze využít, potřebujeme-li vyšší přídržný moment. Nutno podotknout, že jednotka nedokáže fungovat v provozu 200 kroků na otáčku. [3] [11]

Tabulka 3.2 Zapojení ŘJ do sběrnic karty MF624

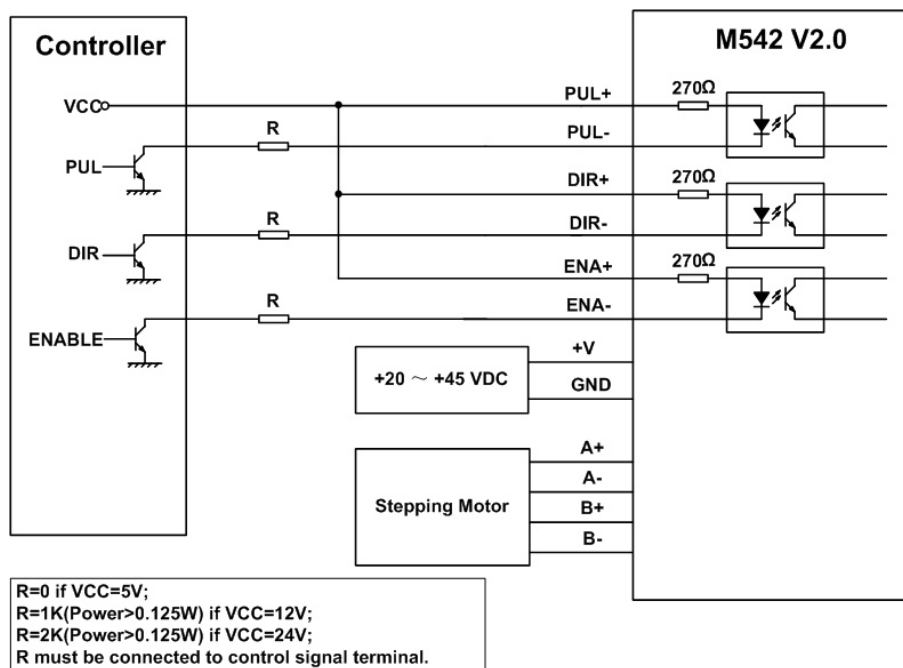
<i>Signál</i>	<i>Sběrnice X1</i>	<i>Sběrnice X2</i>
<i>PUL +</i>		T0OUT
<i>PUL -</i>	GND	
<i>DIR +</i>	DOUT1	
<i>DIR -</i>	GND	
<i>ENA +</i>	DOUT0	
<i>ENA -</i>	GND	

3.2.3 Krokový motor

Pro testování a měření parametrů je využit krokový motor LDO-42STH47-1684AS. Jedná se o hybridní, bipolární, dvoufázový, 8-mi pólový stroj. S 50 zuby na rotoru a tím 1,8° na jeden krok. [7]

Tabulka 3.3 Parametry krokového motoru [7]

Jmenovité napětí	2,8 VDC	Úhel kroku	1,8 °
Odpor jedné fáze	1,65 ohm	Jmenovitý proud	1,68 A
Zádržný moment	3,6 Kg*cm	Indukčnost fáze	3,6 mH
Moment setrvačnosti	45 gcm ²	Max start frekvence	4500 pps

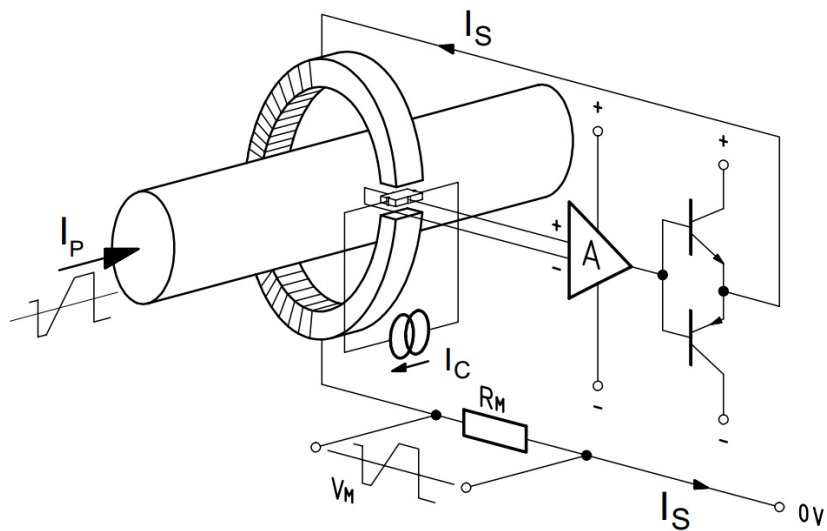


Obrázek 3.3 Schéma zapojení řídicí jednotky a krokového motoru. Převzato z [11]

3.2.4 Proudové čidlo

Pro měření proudu je využito senzoru LEM s operačním zesilovačem a další elektronikou. Celé čidlo bylo vyrobeno Janem Chalupou [12]

„Čidlo LEM funguje na principu konstantního toku v magnetickém obvodu, který je tvořen toroidním jádrem, snímaným vodičem, cívkou a hallovým elementem. Proud I_p protékající vodičem vytváří konstantní či proměnlivé magnetické pole, které vyvolává změnu magnetického toku v toroidním jádře. Tok jádrem je snímán pomocí hallova elementu a napětí na tomto elementu řídí operační zesilovač. Výstup operačního zesilovače je posílen tranzistory, které dodávají potřebný proud I_s tak, aby se kompenzovala změna magnetického toku. Proud I_s prochází cívkou, která je namotána na toroidním jádře. Tento proud slouží k vyhodnocování velikosti proudu I_p . Výstupy jednotlivých typů čidel můžou být proudové nebo napěťové.“ [12]



Obrázek 3.4 Princip fungování čidla LEM [12]

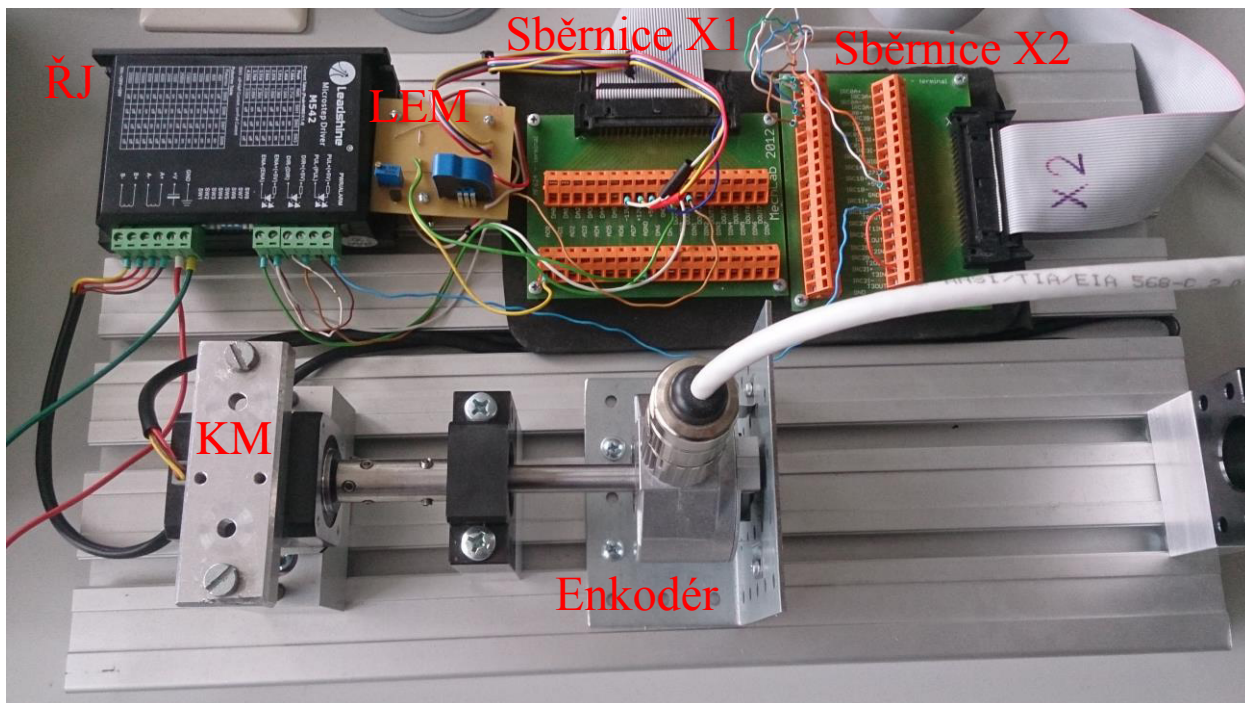
Čidlo proudu je zapojeno do série jedné fáze mezi řídicí jednotkou a krokovým motorem. Napájení a signály jsou přivedeny do sběrnice karty MF624 podle následující tabulky (3.4).

Tabulka 3.4 Zapojení čidla proudu

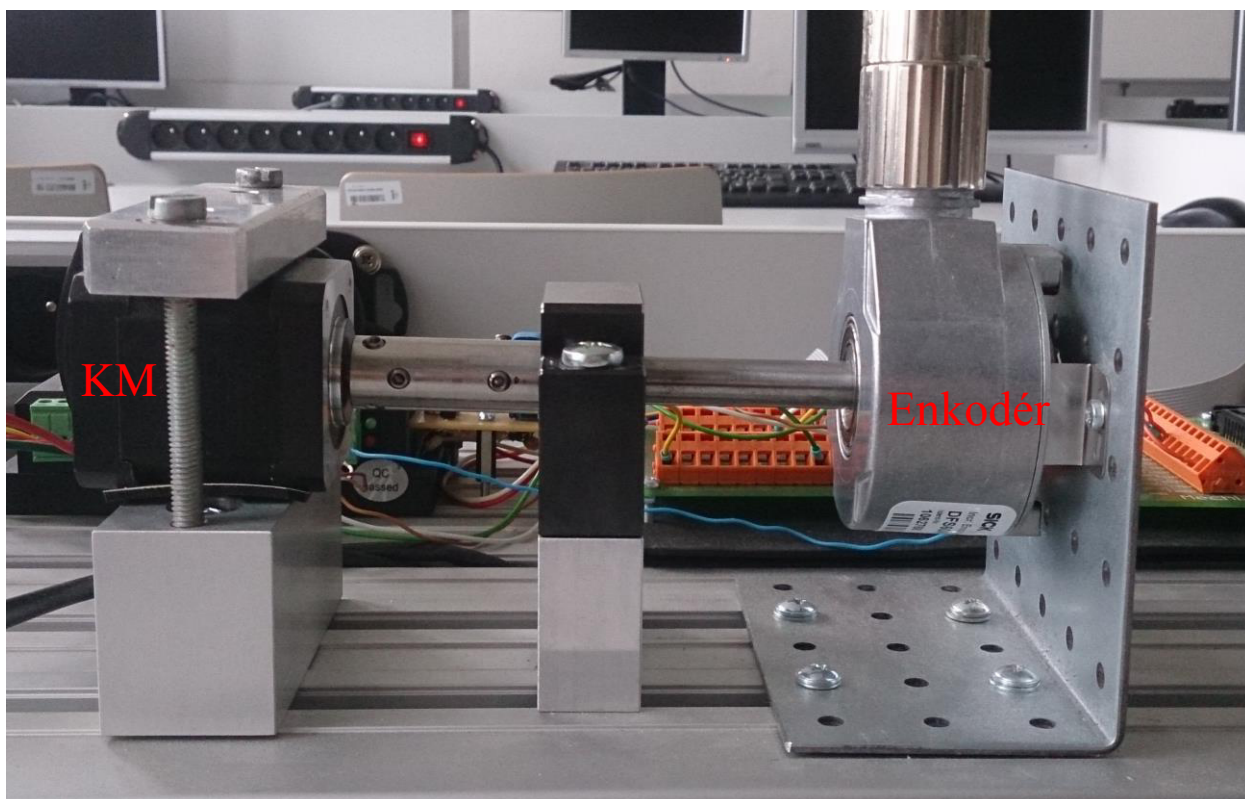
SIGNÁL	VODIČ	SBĚRNICE X1
+12V	červená	+12V
-12V	černá	-12V
+5V	bílá	+5V
AGND	zelená	AGND
ANALOG SIGNAL	žlutá	AD0
VSTUP/VÝSTUP MĚŘENÉHO PROUDU	bílá/červená	

3.3 Reálný pohled na celé testovací zařízení

Na obrázku (3.3) je vyobrazena celá sestava se všemi použitými komponenty.



Obrázek 3.5 Reálná podoba celého zařízení



Obrázek 3.6 Boční pohled na uložení KM a enkodéru

4 PŘIPOJENÍ A ŘÍZENÍ TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ Z PROSTŘEDÍ MATLAB-SIMULINK

Celé zařízení je nutné propojit s počítačem a mít možnost řízení v reálném čase. Pro to nám slouží karta MF624 a Matlab/Simulink.

4.1 Zapojení karty MF624

Řídící jednotka, enkodér a čidlo proudu jsou spojeny s PC pomocí multifunkční vstupně/výstupní karty MF624. [8]

MF 624 vstupy:

- Analogový signál z čidla proudu (0-10V)
- Signály z enkodéru (A, -A, B, -B, I, -I)

MF 624 výstupy:

- PWM - signál pro řídicí jednotku
- DIR - směr otáčení motoru
- ENABLE – aktivování motoru

4.2 Řízení pomocí Simulinku a RTWT

V prostředí Matlab²/Simulink byl vytvořen Real-Time řídicí software pomocí toolboxu *Real-time Windows Target*. Vzorkovací kmitočet celého modelu byl nastaven na 10^4 Hz. [9]

Výhody a možnosti použití RTWT v external modu:

- Řízení v reálném čase (hard real time)³
- Celý program může fungovat na vzorkovacím kmitočtu až 10 kHz

Nevýhody:

- Při každém spuštění simulace se musí provést kompilace
- Omezení paměti v prostředí Matlab/Simulink⁴

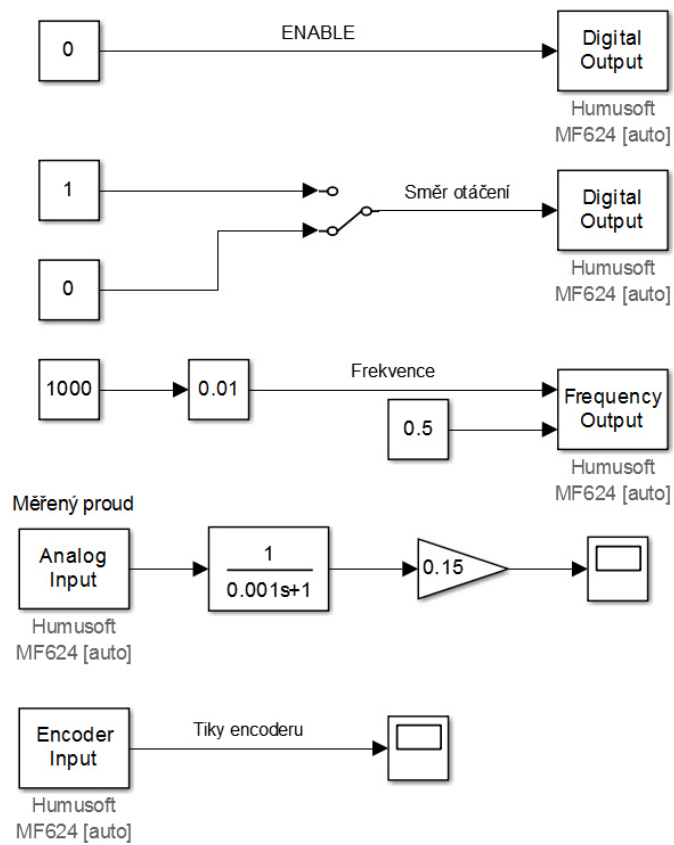
Použité bloky z RTWT toolboxu:

- Frequency Output – generuje PWM signál, nastavujeme střídu a frekvenci
- Digital Output – propojení digitálního signálu z modelu na výstup karty
- Analog input – propojení analogového signálu přivedeného na A/D převodník karty s modelem
- Encoder Input – udává počet impulsů enkodéru zpracovaných kartou

² Použitá verze Matlab 2012b

³ Řízení v reálném čase s větším zachováním determiničností

⁴ Při zobrazování delších průběhů docházelo k přeplnění paměti a nutnosti znovu spuštění Matlab/Simulink.



Obrázek 4.1 Schéma generování kroků, měření polohy a proudu z prostředí Matlab-Simulink

5 MĚŘENÍ PRŮBĚHU BUDÍCÍCH PROUDŮ

V této kapitole bude měřen budící proud, který řídící jednotka pouští do KM. Způsob připojení čidla proudu je již zmíněn v podkapitole (3.2.4). Měřený proud nám dá informaci a představu o tom, jakým způsobem ŘJ rozděluje proud při mikro-krokování a jak jsou navzájem posunuty obě fáze motoru.

Měřený proud byl navíc softwarově filtrován pomocí přenosové funkce použité jako filtr s dolní propustí. Obrázek (4.1)

5.1 Výpočet zesílení čidla proudu

Výstupem z čidla je napětí jako informace o proudu. Pro zjištění zesílení byl do série místo motoru připojen známý odpor 2R7 ($R_p = 2,7 \text{ ohm}$) a ze zdroje bylo nastaveno konstantní napětí, které bylo na odporu naměřeno $U_R = 1V$. Z Ohmova zákona se poté spočítal protékající proud:

$$I = \frac{U_R}{R_p} = \frac{1}{2,7} = 0,37A \quad (5.1)$$

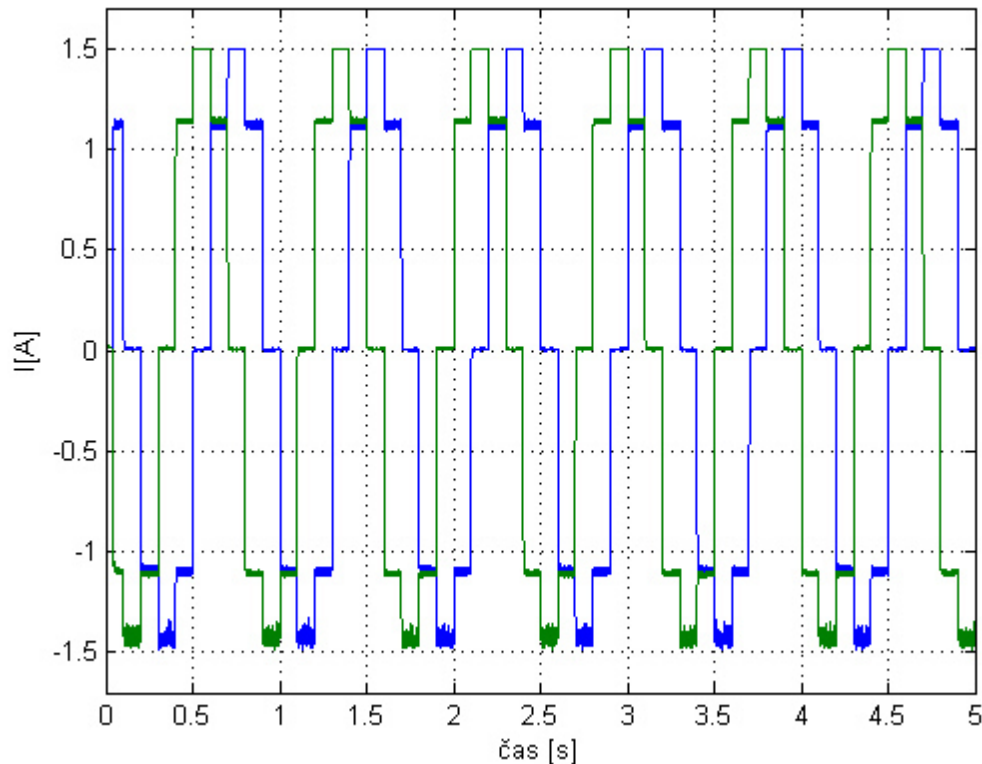
Při tomto proudu bylo v Simulinku změřeno ustálené napětí sondy $U_s = 2,46V$.

Výpočet zesílení čidla proudu poté je:

$$K_{\check{c}i} = \frac{I}{U_s} = \frac{0,37}{2,46} = 0,15 \quad (5.2)$$

5.2 Budící proud obou fází

Jelikož bylo k dispozici pouze jedno čidlo proudu. Musel se nejdříve zaznamenat proud jednou a poté druhou fází. Veškeré nastavení zůstalo stejné, a protože v takovém případě řídicí jednotka vždy začne simulaci stejným způsobem, stačilo jen obě hodnoty vynést zároveň do grafu. Byla nastavena nejnižší možná hodnota 400 kroků na otáčku. Saturaci na hodnotě $I = 1,5$ A se budeme zabývat později.

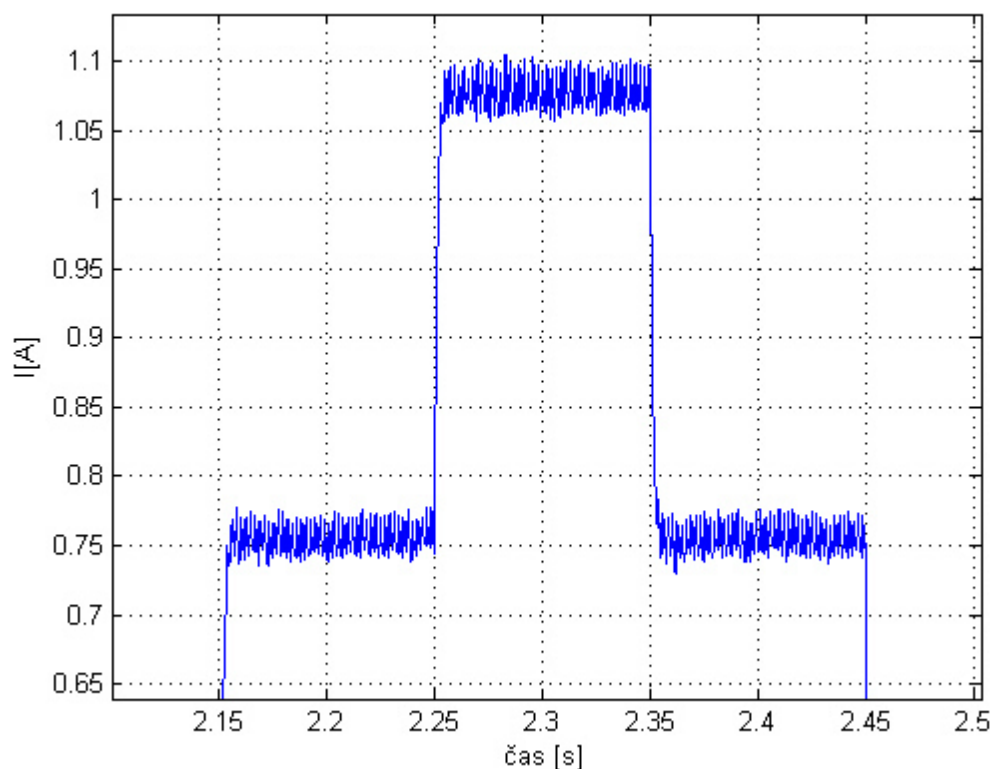


Obrázek 5.1 Průběh budících proudů obou fází

Můžeme pozorovat, že vliv dvojnásobného mikro-krokování nám způsobil rozdělení náběhu amplitudy na dvě části. Jak uvidíme dále, tak každé zdvojnásobení mikro-krokování vede ke zdvojnásobení počtu rozdělení.

Při tomto měření bylo nastaveno na ŘJ omezení amplitudy proudu $I = 1,46$ A. Střední proud označený jako RMS má hodnotu 1 A. Toto odpovídá již dříve zmíněnému zesílení řídicí jednotkou z kapitoly (3.2.2). Amplituda proudu je shodná s nastaveným omezením ŘJ s malou odchylkou.

Na obrázku (5.2) je detailní pohled na proud při omezení řídicí jednotkou na amplitudě proudu $I = 1$ A. Je patrné, že dochází k šumu. Ten je způsobený kombinací regulace proudu ŘJ a šumem v analogové části snímače.



Obrázek 5.2 Detailní pohled na průběh budícího proudu

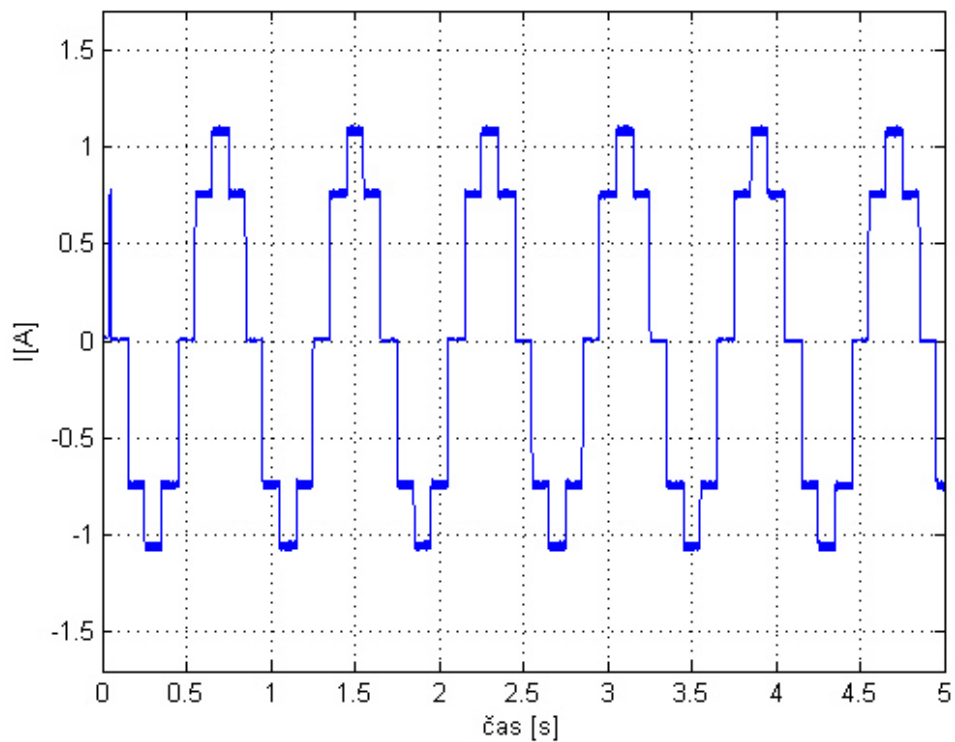
Fáze jsou posunuty tak, že pokud jednou fází teče plný proud, další fáze je vypnuta. V určitých okamžicích mikro-kroků jsou hodnoty proudů obou fází nastavovány v určitých poměrech a překrývají se v hodnotě RMS. Fáze se předbíhají podle toho, jaký je nastaven směr otáčení motoru.

5.3 Vliv zvyšování mikro-krokování na budící proud

O funkci mikro-krokování vypovídá kapitola (2.3.2). Toto měření bude zaměřeno na seznámení se s budícími proudy v těchto režimech.

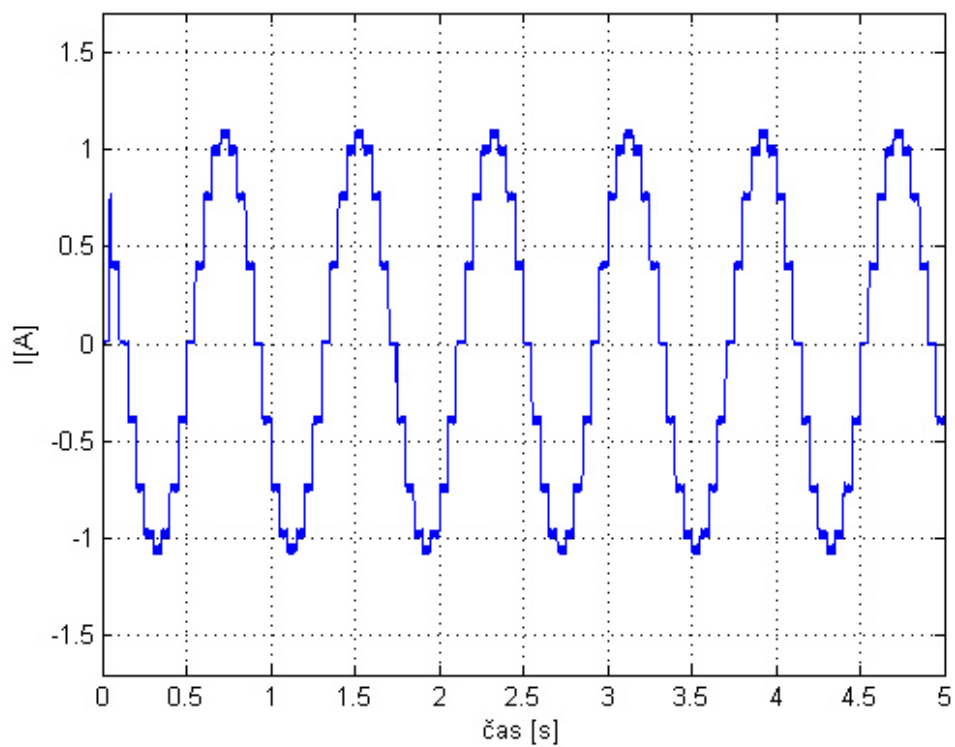
Postupným zvětšováním mikro-krokování budeme demonstrovat činnost řídicí jednotky a jejího rozdělování proudů.

a)



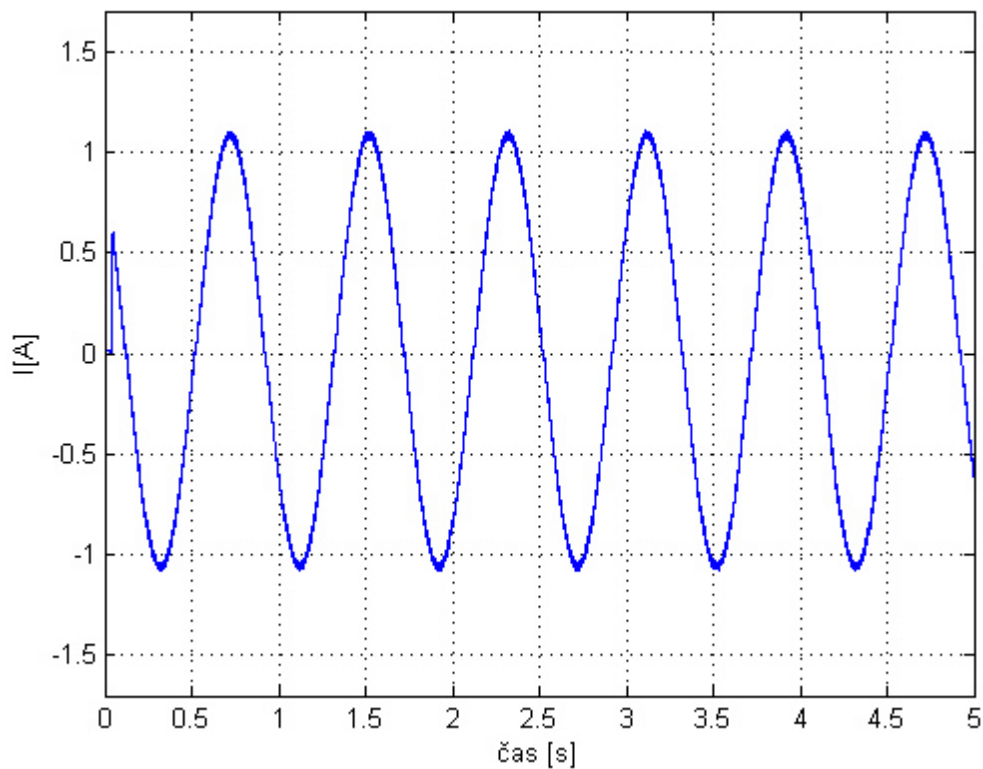
Obrázek 5.3 Budící proud při 400 kroků/otáčka, 10 Hz

b)



Obrázek 5.4 Budící proud při 800 kroků/otáčka, 20 Hz

c)

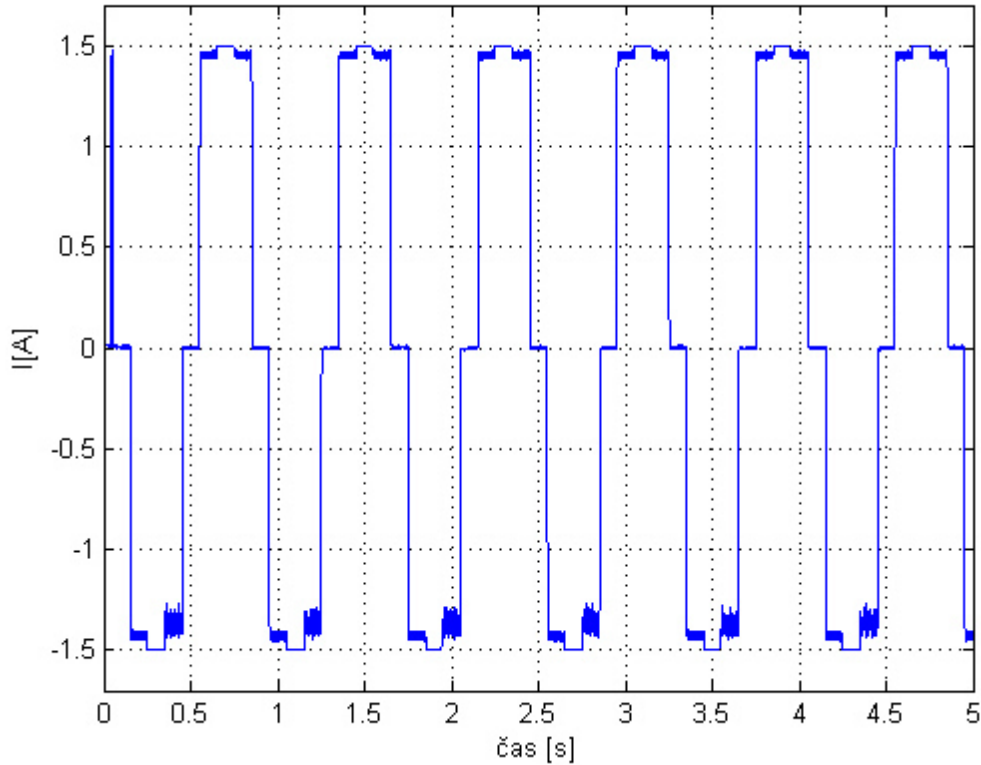


Obrázek 5.5 Budící proud při 25600 kroků/otáčka, 640 Hz

Jak můžeme z průběhů grafů pozorovat, se zvyšujícím mikro-krokováním přibývá počet inkrementů. Ty jsou postupem tak malé, že se průběh začne blížit funkci sinus. Obecně se dá říci, že čím více se průběh blíží funkci sinus, tím se dá ŘJ požadovat za kvalitnější.

5.4 Saturace měřeného proudu

O omezování proudu již bylo zmiňováno v podkapitole (5.2). Nyní bude pojednáno o saturaci proudu na hodnotě 1,5A.



Obrázek 5.6 Budící proud při omezení amplitudy na 1,91 A

Jak je patrné, tak na hodnotě 1,5A dochází k saturaci. Toto avšak není způsobeno řídicí jednotkou, ale omezením karty MF624. Pokud se vrátíme k našemu výpočtu zesílení, které bylo z rovnice (5.2) $K_{\text{či}} = 0,15$, tak pro zpětný přepočítání proudu 1,5A nám sonda posílá napětí do karty:

$$U_s = \frac{I}{0,15} = \frac{1,5}{0,15} = 10V \quad (5.3)$$

Což je hraniční hodnota, uváděná v datasheetu karty MF624, kterou je možné změřit. Přivedením více jak 10V nedojde ke zničení karty. Maximální napětí, které bylo přivedeno na kartu je 13V.

Tento poznatek nám potvrdil přesnost hodnoty experimentálně zjištěného zesílení čidla proudu $K_{\text{či}}$.

6 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK MOTORU

Tato kapitola bude zaměřena na testování mechanické stránky motoru. Především se měření bude zabývat ztrátou kroků při různých režimech řízení.

6.1 Měření linearity polohování

6.1.1 Cíl měření

Záměrem tohoto experimentu je zjistit odchylku reálného kroku od toho ideálního. Měření probíhá po celé jedné otáčce a tím se zjistí, zdali v některých úsecích nedochází k větším chybám.

6.1.2 Způsob měření

Je nastaveno mikro-krokování 400 kroků/otáčku. Při větší hodnotě dochází k vyhlazování, takže bychom nebyli schopni odečítat kroky. Frekvence PWM je 10 Hz. Při vyšší rychlosti otáčení dochází vlivem setrvačnosti taktéž k vyhlazování hodnot.

Provedlo se deset opakování a pomocí jednoduchého skriptu v Matlabu byly určeny velikosti jednotlivých skoků v ustálené poloze. Tyto hodnoty byly odečteny od ideálního natočení 0,9°. Jelikož se jednalo o kladné i záporné hodnoty, byl vypočítán kvadratický průměr a k tomu směrodatná odchylka.

Kvadratický průměr:

$$K = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (6.1)$$

N – počet hodnot

x – jednotlivé hodnoty

Směrodatná odchylka:

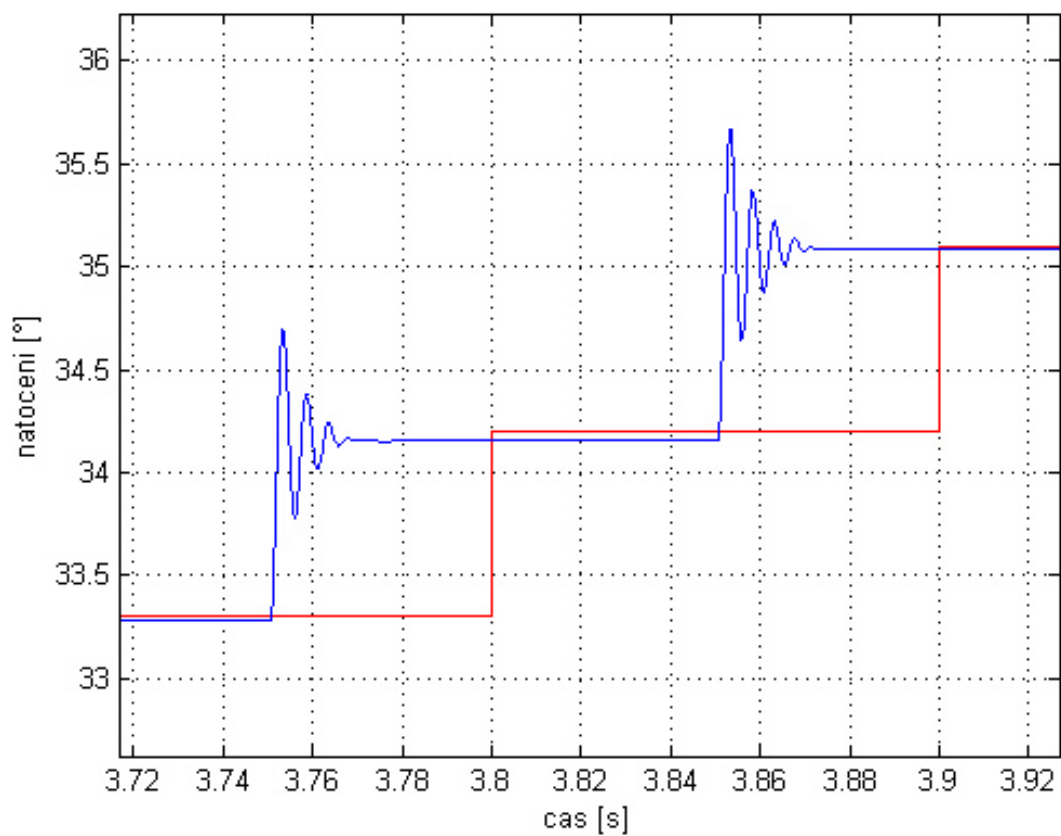
$$s = \sqrt{K - \bar{x}^2} \quad (6.2)$$

\bar{x} – aritmetický průměr

Na obrázku (6.1) můžeme sledovat průběh reálných kroků i se svými typickými překmity, které jsou proloženy ideálním skokem o 0,9°. Posunutí ve směru osy x je způsobeno nastavenou střídou PWM.

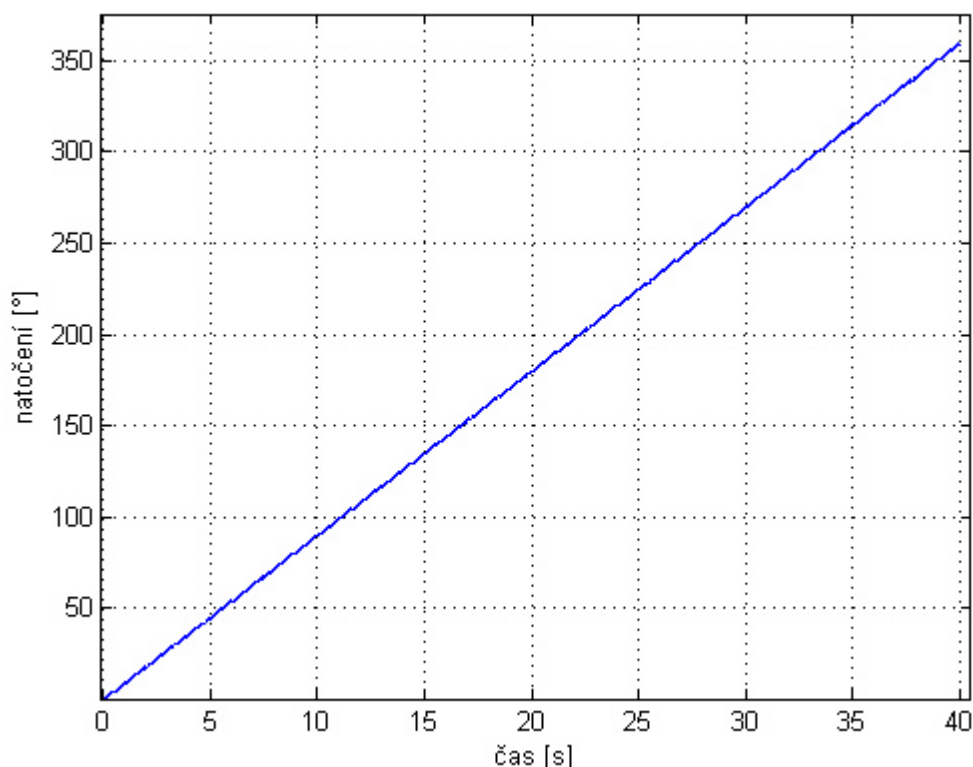
Tabulka 6.1 Vypočtené hodnoty linearity polohování

	s [°]	K [°]
1	0,0105	0,0220
2	0,0104	0,0220
3	0,0099	0,0210
4	0,0101	0,0212
5	0,0104	0,0226
6	0,0111	0,0239
7	0,0111	0,0241
8	0,0112	0,0236
9	0,0110	0,0244
10	0,0101	0,0225



Obrázek 6.1 Průběh reálných kroků proložený ideálními kroky

Na obrázku (6.2) je znázorněno lineární narůstání polohy s jednotlivými kroky.



Obrázek 6.2 Graf závislosti natočení na čase

Podle datasheetu motoru [7] víme, že odchylka by měl být při kroku $1,8^\circ \pm 5\%$. Pokud budeme uvažovat zachování přesnosti, tak při kroku $0,9^\circ$ by 5% odpovídalo odchylce $0,045^\circ$. Z našeho měření vyplývá, že střední hodnota chyby se pohybuje s rozptylem $s = \pm 0,0106^\circ$ kolem hodnoty $0,0227^\circ$. Což je dobrý výsledek, který potvrzuje přesnost motoru udávanou v datasheetu v celém rozsahu natočení. Maximální odchylka byla $0,0415^\circ$, která je již velice blízká uvedené odchylce od výrobce.

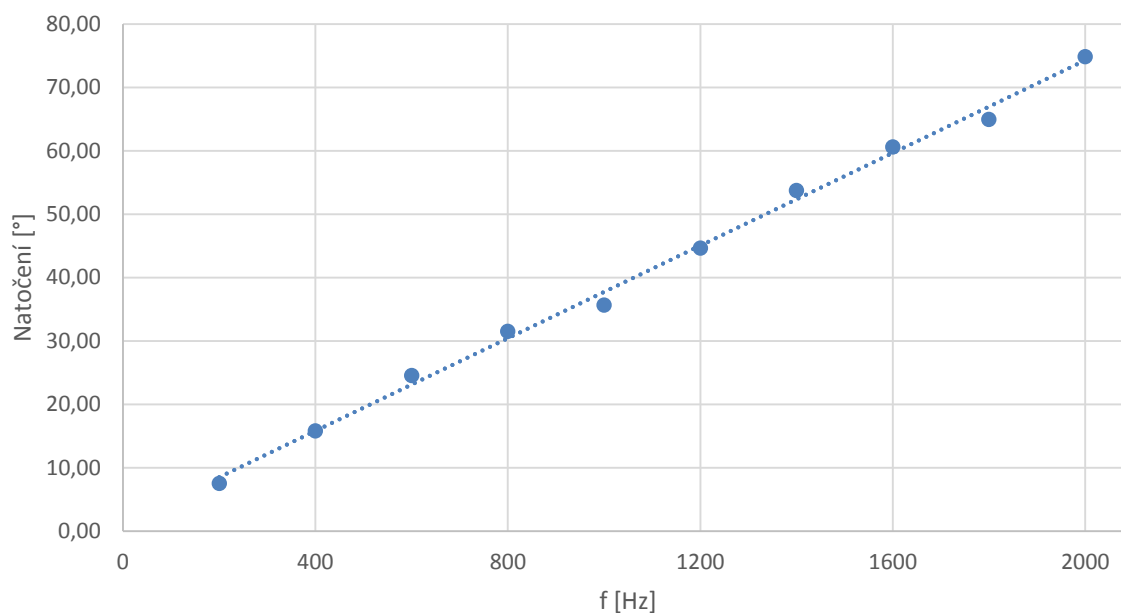
6.2 Ztráta kroků v závislosti na skokové změně budící frekvence

6.2.1 Cíl měření

Toto měření by nám mělo ukázat, jak se vyvíjí počet ztracených kroků v závislosti na frekvenci skokového rozběhu KM.

6.2.2 Způsob měření

Pro měření vyslaných pulsů byla použita periferie čítače karty MF624, která počítá vstupní pulsy do řídicí jednotky. Reálné kroky byly snímány z enkodéru a poté odečteny od vyslaných pulsů. Hodnota byla uložena 3 vteřiny po rozběhu tak, aby byla již ustálená rychlost a 2 vteřiny před koncem simulace, aby výsledek nemohl být nikterak ovlivněn doběhem motoru.

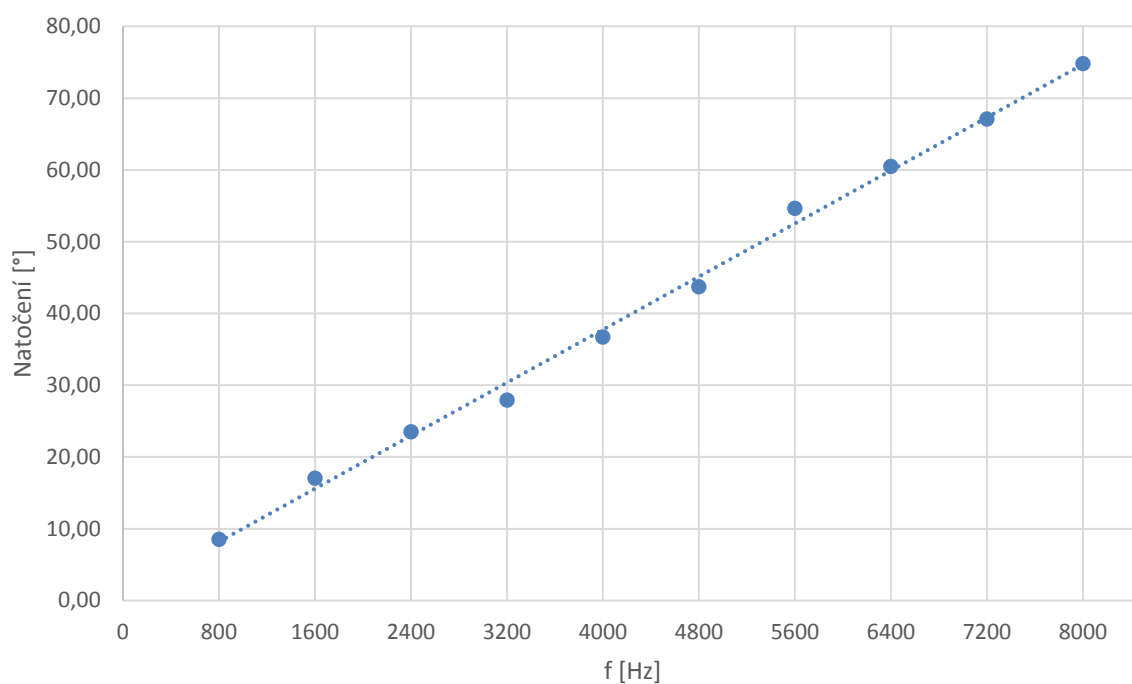


Obrázek 6.4 Graf závislosti počtu ztracených kroků, přepočítaných na natočení motoru, na velikosti frekvence při 400 kroků/otáčku

Můžeme pozorovat, že počet ztracených kroků se lineárně zvyšuje s velikostí frekvence.

6.2.4 Měření pro 1600 kroků/otáčku

Pro porovnání bylo měření opakováno s nastaveným mikro-krokováním 1600 kroků/otáčku, což odpovídá natočení $0,225^\circ$ na jeden krok. Rozsah frekvence byl taktéž čtyřikrát zvětšen na hodnotu 800-8000 Hz. Při těchto parametrech byly naměřeny následující hodnoty.



Obrázek 6.5 Graf závislosti počtu ztracených kroků, přepočítaných na natočení motoru, na velikosti frekvence při 1600 kroků/otáčku

Tabulka 6.3 Vypočtené ztracené natočení při skokovém rozběhu (1600kroků/otáčku)

f[Hz]	průměr	natočení [°]
800	37,84	8,51
1600	75,75	17,04
2400	104,36	23,48
3200	124,02	27,90
4000	163,17	36,71
4800	194,33	43,72
5600	242,91	54,65
6400	268,87	60,50
7200	298,06	67,06
8000	332,44	74,80

Jak nám znázorňuje graf a tabulka druhého měření, tak celková chyba natočení, je takřka srovnatelná s prvním měřením s nižším mikro-krokováním. Ačkoliv ve druhém měření je mnohem více ztracených kroků, tak tyto kroky odpovídají mnohem menšímu natočení.

Z tohoto vyplývá, že velikost mikro-krokování nemá vliv na přesnost natočení. Tato chyba je způsobena jen konstrukcí motoru. Dále můžeme usoudit, že tento způsob rozběhu není vhodný i vzhledem k tomu, že není možno dosáhnout vyšších otáček.

6.3 Ztráta kroků při konstantní rychlosti

6.3.1 Cíl měření

V předchozí kapitole (7) jsme zjistili, jak se vyvíjí ztráta kroků při rozběhu. Nyní se zaměříme na oblast při konstantní rychlosti.

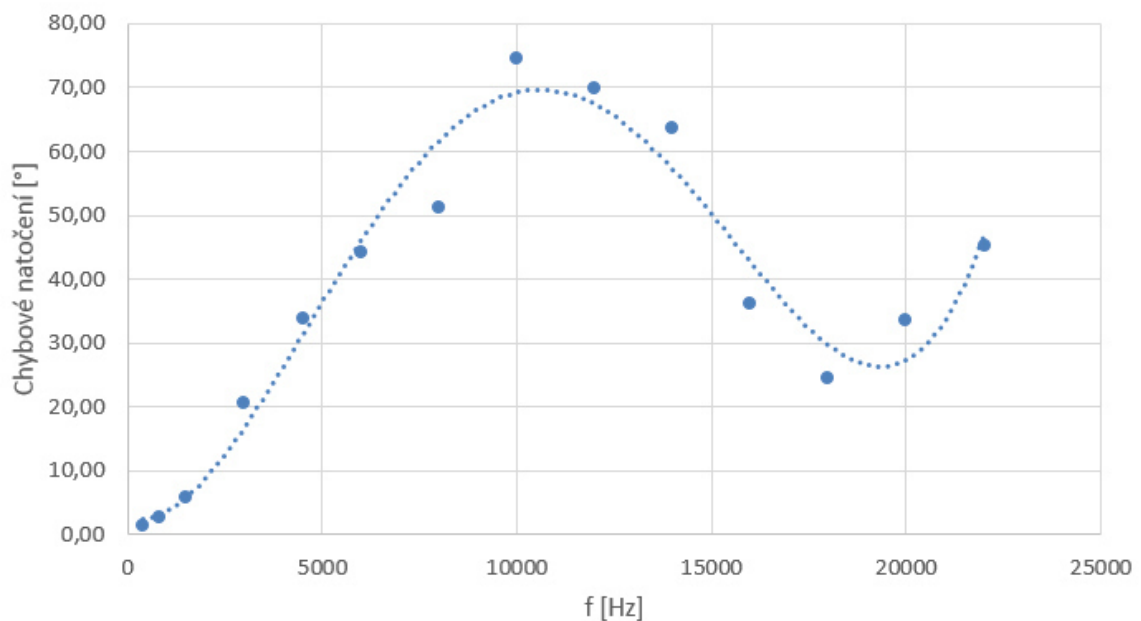
6.3.2 Způsob měření při mikro-krokování 1600 kroků/otáčku

Měření probíhá následujícím způsobem. Motor se rozběhne s požadovanou frekvencí PWM pomocí rampy, aby bylo možné dostat se i na vyšší frekvence. Při ustálení rychlosti se odečte hodnota ztracených kroků. Po 10s simulace se uloží aktuální hodnota ztracených kroků a po další sekundě se simulace zastaví. To z důvodu, aby měření nebylo ovlivněno doběhem motoru. Od aktuální hodnoty odečteme tu počáteční po rozběhu a tím dostaneme počet ztracených kroků při konstantní rychlosti za časový úsek 10s.

Při měření je použité mikro-krokování 1600 kroků/otáčku, při kterém jeden krok odpovídá natočení $0,225^\circ$. Rozsah frekvence je zvolen 400-22000 Hz. Pro každou frekvenci bylo naměřeno 5 hodnot. Následující tabulka (6.4) zobrazuje počet ztracených kroků, aritmetický průměr (v tabulce označen X) a odpovídající chybové natočení.

Tabulka 6.4 Naměřené a vypočtené hodnoty ztrát kroků při konst. rychlosti

f [Hz]	1	2	3	4	5	X	natočení[°]
400	7,80	5,14	5,95	3,90	6,80	5,92	1,33
800	7,87	13,93	12,98	11,98	10,85	11,52	2,59
1500	22,12	24,15	27,98	28,07	26,22	25,71	5,78
3000	104,70	98,99	92,92	72,00	91,82	92,09	20,72
4500	172,80	140,00	151,00	138,20	151,10	150,62	33,89
6000	210,00	157,80	191,10	216,10	209,00	196,80	44,28
8000	231,40	215,50	249,50	230,50	212,50	227,88	51,27
10000	325,60	335,10	351,50	323,10	320,90	331,24	74,53
12000	295,70	336,90	302,80	308,20	310,10	310,74	69,92
14000	295,00	263,00	295,40	290,70	270,00	282,82	63,63
16000	184,70	211,40	143,20	123,60	143,10	161,20	36,27
18000	114,80	93,05	111,00	113,40	114,00	109,25	24,58
20000	174,40	163,90	138,10	138,30	133,90	149,72	33,69
22000	185,10	227,10	191,30	209,50	194,80	201,56	45,35



Obrázek 6.6 Graf závislosti chybového natočení na frekvenci při konstantní rychlosti

Z obrázku (8.1) je patrné, že při jistých vyšších frekvencích má motor lepší vlastnosti než při nižších. Toto je z důvodu, že narážíme na vlastní frekvence motoru, při kterých dochází k rezonancím a tím je zvýšen počet ztracených kroků.

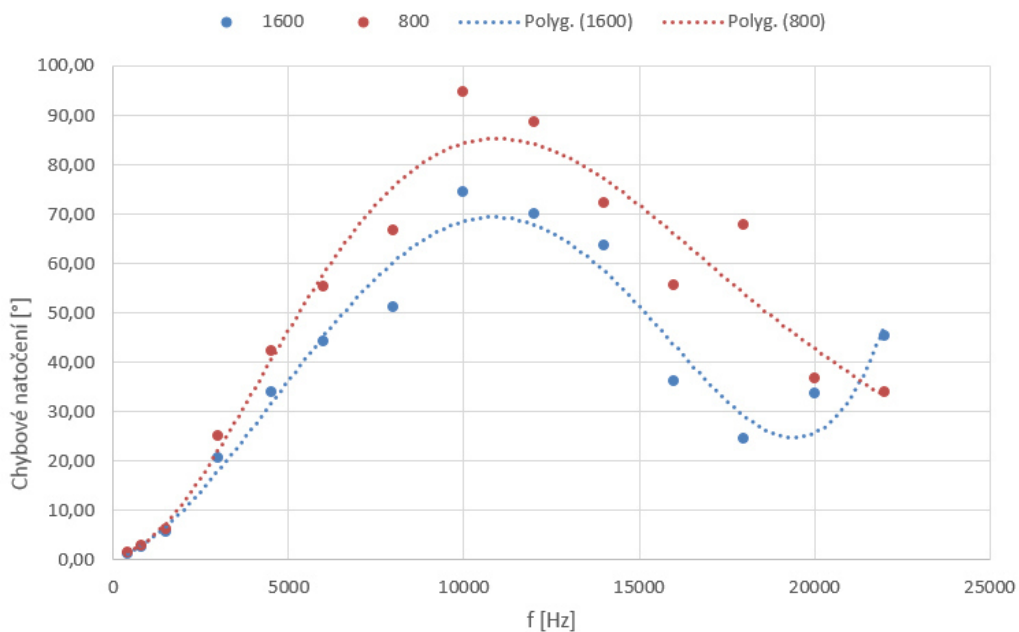
6.3.3 Měření při mikro-krokování 800 kroků/otáčku

Pro porovnání bylo měření opakováno s mikro-krokováním 800 kroků/otáčku. Způsob měření zůstává stejný jako v předchozím (6.3.2). Pro zachování stejné rychlosti otáčení hřídele je i dvojnásobně snížená frekvence PWM v rozsahu 200-11000 Hz. V tabulce je opět počet ztracených kroků, aritmetický průměr (označený X) a chybové natočení pro 0,45° na jeden krok.

Tabulka 6.5 Naměřené a vypočtené hodnoty ztrát kroků při konst. rychlosti

f [Hz]	1	2	3	4	5	X	natočení[°]
200	3,8	0,9	4,8	3,5	4,96	3,592	1,6164
400	10,18	5,22	4,37	5,91	7,8	6,696	3,0132
750	10,34	11,37	15,58	16,61	16,47	14,074	6,3333
1500	59,7	56,78	53,82	44,9	64,75	55,99	25,1955
2250	96,42	90,53	85,6	101,7	96,64	94,178	42,3801
3000	127,6	110,2	132,7	114,6	128,6	122,74	55,233
4000	142,9	133,6	151,7	166,7	146,6	148,3	66,735
5000	237,8	225,5	186,4	191,3	210,3	210,26	94,617
6000	198,7	194,5	195,3	204,1	191,85	196,89	88,6005
7000	142,1	160,9	160	181	158,48	160,496	72,2232
8000	132,4	99,41	145,2	117,4	123,5	123,582	55,6119
9000	148,3	171,6	113,3	155,6	166	150,96	67,932
10000	87,24	69,29	86,4	81,5	84,39	81,764	36,7938
11000	82,33	63,18	90,16	63,52	77,07	75,252	33,8634

Na obrázku (8.2) je znázorněn původní průběh a poté měření při 800 kroků/otáčku, které je v grafu uzpůsobeno tak, aby odpovídalo rozsahu frekvence 400-22000 Hz.



Obrázek 6.7 Porovnání chybového natočení dvou režimů mikro-krokování

Z obrázku (8.2) je patrné, že při nízkých frekvencích se hodnoty kryjí, ale se zvyšující se rychlostí dochází k větším rozptylům a tím k odchylkám mezi jednotlivým měřením. Avšak průběh je až na jednu chybovou hodnotu srovnatelný.

6.4 Testování dynamiky rozběhu KM

6.4.1 Cíl měření

Jak bylo zjištěno v kapitole (7) skokovým rozběhem není možné KM roztočit na vyšší frekvence a dochází ke značným ztrátám kroků. Proto bude toto měření zaměřeno na zjištění ideální náběhové funkce, která by zajistila rychlý náběh na požadovanou hodnotu a zároveň nebude docházet k velkým ztrátám kroků.

6.4.2 Ideální rozběh KM pomocí náběžné rampy

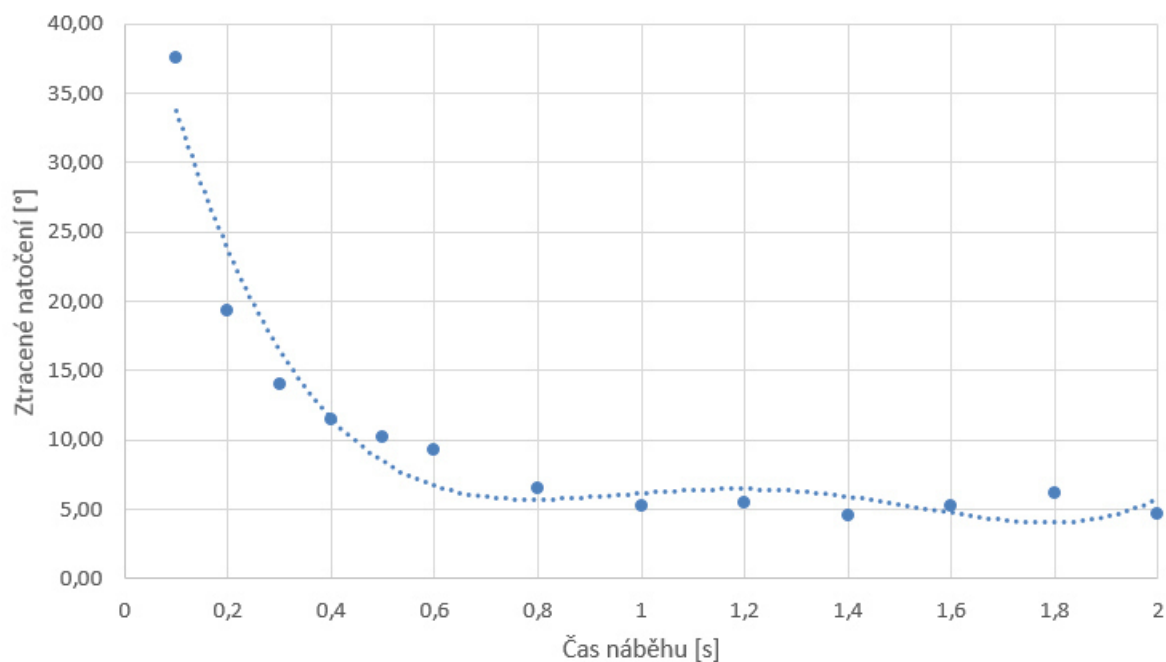
Pro měření je využit stejný model zapojení jako při měření skokového rozběhu, jen frekvence je generována pomocí bločku „ramp“ a na požadované hodnotě je náběh zastaven pomocí saturace. Pro měření je využito mikro-krokování na hodnotě 1600 kroků/otáčku, kterému odpovídá natočení 0,225°.

Hodnota ztracených kroků byla vždy odečtena při dosažení ustálené hodnoty požadované frekvence 20 kHz. Při této hodnotě frekvence a daném mikro-krokování (1600) dosahuje rychlost otáčení 170 ot/min.⁵ Aritmetický průměr naměřených ztracených kroků (v tabulce označeno X) a odpovídající natočení je v následující tabulce (6.6)

Tabulka 6.6 Ztracené kroky při použití náběžné rampy

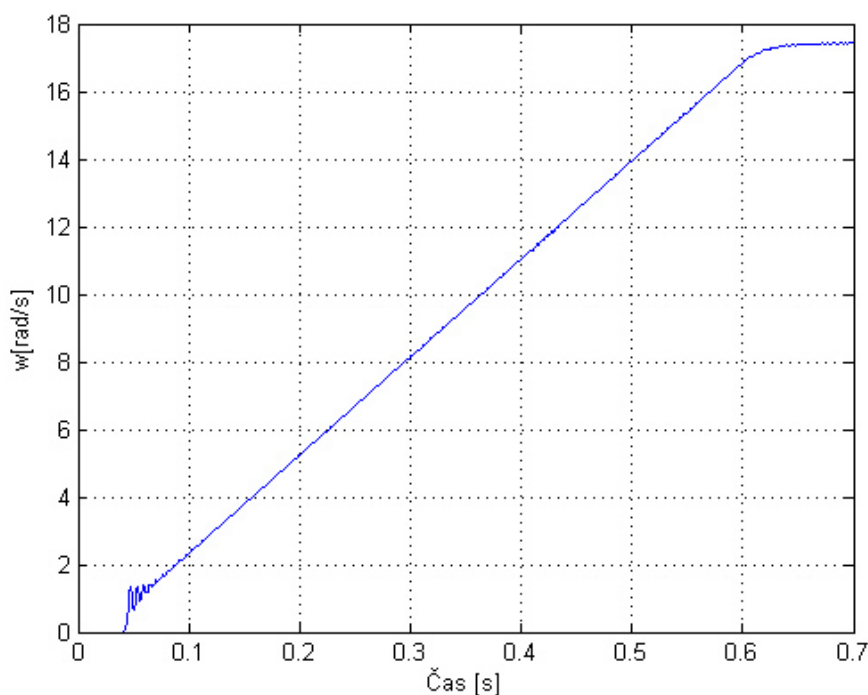
náběh [s]	X	natočení [°]
2	20,88	4,70
1,8	27,66	6,22
1,6	23,16	5,21
1,4	20,13	4,53
1,2	24,15	5,43
1	23,31	5,24
0,8	28,85	6,49
0,6	41,47	9,33
0,5	45,56	10,25
0,4	51,03	11,48
0,3	62,08	13,97
0,2	85,76	19,30
0,1	166,88	37,55

⁵ Pomocí bločku derivace byla z natočení počítána úhlová rychlost



Obrázek 6.8 Graf závislosti ztraceného natočení na čase náběhu

Z grafu je patrné, že od času náběhu 0,1s ztracené natočení exponenciálně klesá až do hodnoty 0,8s, kde se s určitým rozptylem ustálí kolem hodnoty 5°. Tato ustálená chyba je z největší části způsobena těsně po zapnutí simulace, kde závisí na tom, v jaké výchozí poloze jsou rotorové zuby oproti těm statorovým. Dochází poté k polohovým chybám při rozběhu, jak je znázorněno na obrázku (8.2). Tato chyba při rozběhu se někdy dostává i do záporných hodnot. To znamená, že motor nejprve cukl na opačnou stranu a až poté se začal otáčet požadovaným směrem.



Obrázek 6.9 Graf závislosti rychlosti v čase

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo sestavit testovací zařízení pro krokové motory.

V první části byl nastíněn princip krokových motorů a možnosti jejich řízení. Pro demonstraci byl vytvořen matematický model, který byl simulován s reálnými parametry v prostředí Matlab/Simulink. Z důvodu dostupnosti a znalosti uživatelského rozhraní byl tento program vhodný i pro aplikaci řízení motoru a zpracování naměřených dat.

Další část se zabývala návrhem mechanické a elektronické podoby testovacího zařízení. Byl vytvořen 3D model a z něj technická dokumentace potřebná pro výrobu jednotlivých součástí použitých v této testovací jednotce. Tato část byla doplněna o schéma elektronického zapojení. U použitých komponent byl uveden způsob připojení a ovládání z prostředí programu Matlab/Simulink. Všechny tyto použité komponenty byly popsány i z hlediska funkčnosti.

Jedna z posledních částí práce byla věnována měření budících proudů. Měření bylo prováděno pomocí čidla proudu (LEM). Analogový signál z čidla byl přiváděn na vstup karty MF624 a následně vyhodnocován v prostředí Matlab/Simulink. Tento experiment nám pomohl důsledněji pochopit princip fungování řídicí jednotky jak při mikro-krokování, tak při funkci omezování budících proudů.

Poslední kapitola se věnovala mechanickým vlastnostem motoru. Byly zjišťovány závislosti ztracených kroků při různých režimech řízení a mikro-krokování. Byla změřena přesnost polohování motoru. Zpracované výsledky odchylky byly lepší, než jaké udává výrobce. Dále bylo zjištěno, že rozběh motoru při skokové změně budící frekvence není vůbec vhodný. Toto měření ukázalo, že maximální frekvence, při které se motor ještě dokáže skokově rozběhnout, nedosahuje frekvence uvedené od výrobce. Při tomto způsobu rozběhu dochází k velkým ztrátám kroků a motor není možné roztočit na vyšší otáčky. Tento poznatek nás vedl k použití náběžné rampy. Z výsledků ztracených kroků při aplikaci této varianty rozběhu lze vyvodit, jakým způsobem je výhodné rozbíhat motor. Také se díky tomuto lineárnímu náběhu může motor dostávat na mnohem vyšší otáčky. U měření ztrát kroků při konstantní rychlosti jsme okrajově narazili na problém s vlastními frekvencemi motoru. Při těchto vlastních frekvencích stroje dochází k větším ztrátám kroků. Podle vyobrazené závislosti ztracených kroků na budící frekvenci je možné určit, při jakých frekvencích je výhodné motor provozovat.

Možností dalšího rozšíření by bylo například připojení dynamometru, kterým by bylo možné měřit moment krokového motoru na hřídeli. Tímto bychom dostali rozšiřující a užitečné informace o průběhu momentu při různých režimech řízení a mikro-krokování. Nebo by také bylo možné zjistit vliv, již zmíněných, vlastních frekvencí na momentu motoru.

LITERATURA

- [1] RAGAB, S.: *Analýza dynamických stavů elektrického pohonu s trojfázovým krokovým motorem*. Zkrácená verze disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky, 2003. [online] 2015-04-15
Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2418-4.pdf>
- [2] POHONNATECHNIKA: *Princip- Krokovy motor*. [online] 2015-04-15.
Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [3] SERVO-DRIVE: *Krokové motory na míru*. [online] 2015-04-15. Dostupné z: http://www.servo-drive.com/specialni_krokov_e_motory_krokov_e_motory_na_miru.php
- [4] ROBOTIKA: *Krokové motory*. [online] 2015-04-20.
Dostupné z: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [5] REM-TECHNIK: *Pokrok díky absolutní poloze* [online] 2015-05-10.
Dostupné z: http://www.rem-technik.cz/pdf/Fraba_Posital_katalog_CZ.pdf
- [6] SICK: *Datasheet enkodéru*. [online] 2015-05-10.
Dostupné z: <https://www.mysick.com/saqqara/im0022626.pdf>
- [7] LDO MOTORS CO., LTD: *Datasheet motoru* [online] 2015-05-10.
Dostupné z: <http://bcdynamics.com/sites/default/files/LDO-42STH47-1684A%20RevA.pdf>
- [8] HUMUSOFT: *MF624* [online] 2015-05-15.
Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>
- [9] HUMUSOFT: *Real-Time Windows Target™* [online]. 2015-05-18.
Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/aknihovny/rtwt/>
- [10] TEXAS INSTRUMENTS: *High resolutions Microstepping Driver* [online]. 2015-05-18. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva416/slva416.pdf>
- [11] LEADSHINE: *Datashett řídicí jednotky* [online] 2015-05-18.
Dostupné z: <http://www.leadshine.com/UploadFile/Down/M542d.pdf>
- [12] CHALUPA, J.: *Návrh zařízení pro power HIL simulaci stejnosměrného motoru*. Diplomová práce, Brno: VUT, FSI. 2014, str. 57.
- [13] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001, 86 s. ISBN 80-214-1978-4.
- [14] CNCSHOP: *Drivery pro KM 2f* [online] 2015-05-24.
Dostupné z: http://www.cncshop.cz/drivery-pro-km_c
- [15] SICK: *Software pro programování enkodéru* [online] 2015-05-24. Dostupné z: <https://www.mysick.com/eCat.aspx?go=FinderSearch&Cat=Row&At=Fa&Cult=English&FamilyID=497&Category=Produktfinder&Selections=29141>
- [16] KENJO, Takashi a Akira SUGAWARA. *Stepping motors and their microprocessor controls*. Oxford: Clarendon Press, 2003, s. 71-95. Monographs in electrical and electronic engineering. ISBN 0-19-859385-6.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1 Znáznornění rotorového (vlevo) a statorového (vpravo) magnetického toku.....</i>	<i>8</i>
<i>Obrázek 2.2 Průběh kroků u hybridního krokového motoru. Převzato z [2]</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 2.3 Schéma buzení bipolárního motoru (vlevo) a řídicí sekvence. Převzato z [10]</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2.4 Schéma motoru včetně elektromechanické vazby [12]</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2.5 Schéma napěťových rovnic KM</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2.6 Schéma momentové rovnice KM.....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2.7 Gráf budících proudů a průběhu natočení</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3.1 3D model testovacího zařízení</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3.2 Schéma celkového zapojení elektroniky zařízení</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3.3 Schéma zapojení řídicí jednotky a krokového motoru. Převzato z [11]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3.4 Princip fungování čidla LEM [12]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3.5 Reálná podoba celého zařízení</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3.6 Boční pohled na uložení KM a enkodéru.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4.1 Schéma generování kroků, měření polohy a proudu z prostředí Matlab-Simulink ..</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5.1 Průběh budících proudů obou fází.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 5.2 Detailní pohled na průběh budícího proudu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5.3 Budící proud při 400 kroků/otáčka, 10 Hz</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.4 Budící proud při 800 kroků/otáčka, 20 Hz</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.5 Budící proud při 25600 kroků/otáčka, 640 Hz</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 5.6 Budící proud při omezení amplitudy na 1,91 A</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 6.1 Průběh reálných kroků proložený ideálními kroky.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 6.2 Graf závislosti natočení na čase</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 6.3 Schéma modelu v Simulinku</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6.4 Graf závislosti počtu ztracených kroků, přepočítaných na natočení motoru, na velikosti frekvence při 400 kroků/otáčku.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6.5 Graf závislosti počtu ztracených kroků, přepočítaných na natočení motoru, na velikosti frekvence při 1600 kroků/otáčku.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6.6 Graf závislosti chybového natočení na frekvenci při konstantní rychlosti</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6.7 Porovnání chybového natočení dvou režimů mikro-krokování</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6.8 Graf závislosti ztraceného natočení na čase náběhu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6.9 Graf závislosti rychlosti v čase</i>	<i>39</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3.1 Zapojení pinů enkodéru a přiřazených signálů [6]</i>	17
<i>Tabulka 3.2 Zapojení ŘJ do sběrnic karty MF624</i>	18
<i>Tabulka 3.3 Parametry krokového motoru [7]</i>	18
<i>Tabulka 3.4 Zapojení čidla proudu</i>	20
<i>Tabulka 6.1 Vypočtené hodnoty linearity polohování</i>	31
<i>Tabulka 6.2 Vypočtené ztracené natočení při skokovém rozběhu (400 kroků/otáčku)</i>	33
<i>Tabulka 6.3 Vypočtené ztracené natočení při skokovém rozběhu (1600kroků/otáčku)</i>	35
<i>Tabulka 6.4 Naměřené a vypočtené hodnoty ztrát kroků při konst. rychlosti</i>	36
<i>Tabulka 6.5 Naměřené a vypočtené hodnoty ztrát kroků při konst. rychlosti</i>	37
<i>Tabulka 6.6 Ztracené kroky při použití náběžné rampy</i>	38

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A/D		analogově digitální převodník
DC	Direct Current	stejnoseměrný proud
DIR	Direction	směr otáčení
DIS	Disable	odpojí tranzistory
ENA	Enable	připojí tranzistory
KM		krokový motor
PI		proporcionální - integrační (regulátor)
PPS	pulses per second	pulsů za sekundu
PUL	Puls	vstupní pulsy ŘJ
PWM	Pulse Width Modulation	pulsně šířková modulace
RMS	Root Mean Square	střední kvadratická hodnota
RTWT	Real Time Windows Target	řídící systém v reálném čase
ŘJ		řídící jednotka

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

B	[kg m ² s ⁻²]	koeficient viskózního tření
i	[A]	proud
J	[kg m ²]	moment setrvačnosti rotujících částí stroje
K	[-]	kvadratický průměr
$K_{\dot{e}i}$	[AV ⁻¹]	zesílení čidla proudu
L	[H]	vlastní indukčnost vinutí každé fáze
M	[H]	vzájemná indukčnost
m	[-]	počet fází
m_i	[Nm]	indukovaný moment
m_z	[Nm]	zátěžný moment
N	[-]	počet hodnot
n	[-]	počet závitů
p	[-]	počet magnetických pólových dvojic rotoru
R	[Ω]	odpor vinutí
R_p	[Ω]	předřadný odpor
s	[-]	směrodatná odchylka
U	[V]	svorkové napětí motoru
u_i	[V]	indukované napětí
U_S	[V]	napětí sondy
U_R	[V]	napětí na odporu
x	[-]	jednotlivé hodnoty
z	[-]	počet zubů rotoru
ω	[rad s ⁻¹]	úhlová rychlost
ϕ_M	[Wb]	magnetický tok permanentním magnetem
φ	[°]	úhlové natočení
λ	[°]	úhel mezi statorovými póly (u 4 – pólového stroje se $\lambda=45^\circ$)

PŘÍLOHY

1. Model krokového motoru v prostředí Matlab/Simulink (kapitola 2.5)
2. 3D model v prostředí SolidWorks (kapitola 3.1)
3. Výkresy dílů (kapitola 3.1)
4. Modely řízení z prostředí Matlab/Simulink (kapitola 5-6)
5. Naměřené hodnoty (kapitola 5-6)
6. Skript na zpracování naměřených hodnot v prostředí Matlab (kapitola 5-6)