



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Evaluace a kalibrace bezkontaktního sensoru
polohy LDC1614

PETR SIBLÍK

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Vedoucí práce: Ing. Nečas Martin MSc., Ph.D.

12.srpna 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Siblík** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **465551**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Evaluace a kalibrace bezkontaktního sensoru polohy LDC1614

Název bakalářské práce anglicky:

Evaluation and Calibration of the LDC1614 Contactless Sensor

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na téma měření polohy pomocí vířivých proudů.
2. Implementujte komunikaci se senzorem LDC1614 pomocí I2C.
3. Proveďte kalibrační experimenty daného čidla (opakovatelnost, přesnost, závislost na teplotě).
4. Sestavte software pro kalibraci daného sensoru.
5. Kriticky zhodnoťte dosažené výsledky a porovnejte je s parametry konkurenčních produktů.

Seznam doporučené literatury:

- (1) LDC Sensor Design [online]. Texas Instruments, 2018 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa930a/snoa930a.pdf>
- (2) LDC1612/LDC1614 Linear Position Sensing [online]. Texas Instruments, 2015 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa931/snoa931.pdf>
- (3) LDC1612, LDC1614 Multi-Channel 28-Bit Inductance to Digital Converter (LDC) for Inductive Sensing [online]. Texas Instruments, 2018 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1614.pdf>
- (4) KOZAKOVIČ, Radko a Milan KERTÉSZ. Vnorení senzorický systém polohy magneticky levitujícího hriadel'a [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www2.humusoft.cz/www/papers/tcp2015/035_kozakovic.pdf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

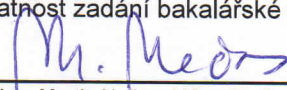
Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

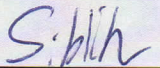

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

3.5.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Evaluace a kalibrace bezkontaktního sensoru polohy LDC1614“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Nečase MSc. PhD. a s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze

.....

Jméno Příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Nečase MSc. PhD. za odborný dohled, konzultace, vedení a čas, který mi věnoval, a které mi značně pomohly k vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat celé mé rodině a přátelům za podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Petr Siblík	
Název BP:	Evaluace a kalibrace bezkontaktního sensoru polohy LDC1614	
Anglický název:	Evaluation and Calibration of the LDC1614 Contactless Sensor	
Rok:	2019	
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství	
Obor studia:	bez oboru	
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky	
Vedoucí BP:	Ing. Nečas Martin MSc., Ph.D.	
Bibliografické údaje:	Počet stran	48
	Počet obrázků	51
	Počet příloh	1
Klíčová slova:	LDC1614, měření polohy, vířivé proudy	
Keywords:	LDC1614, position measurement, eddy currents	
Anotace:	Bakalářská práce je zaměřena na evaluaci a kalibraci bezkontaktního sensoru polohy LDC1614. V teoretické části jsou vysvětleny principy indukčního měření. Praktická část obsahuje postup tvorby aplikace pro kalibraci sensoru. Dále popisuje konkrétní laboratorní měření a zhodnocuje naměřená data a výsledky.	
Annotation:	The bachelor thesis is focused on evaluation and calibration of contactless position sensor LDC1614. The theoretical part explains the principles of inductive measurement. The practical part contains the procedure of creating an application for sensor calibration. Further describes specific laboratory measurements and evaluates the measured data and results.	

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	2
2.1. Vířivé proudy.....	2
2.1.1. Hloubka vniku (Skin depth).....	3
2.2. Specifikace targetu.....	4
2.2.1. Tvar targetu.....	4
2.2.1.1. Postranní/lineární tvar targetu.....	5
2.2.2. Materiál targetu.....	6
2.2.2.1. Vlastnosti ideálního materiálu targetu.....	6
2.2.2.2. Hliník.....	7
2.2.2.3. Měď.....	8
2.2.2.4. Ocel a magnetické materiály.....	8
2.3. Specifikace senzoru.....	9
2.3.1. Frekvence senzoru.....	9
2.3.2. R_s and R_p	10
2.3.2.1. Povrchový jev (Skin effect).....	10
2.3.3. Charakteristiky induktoru.....	11
2.3.3.1. Tvar cívky/induktoru.....	11
2.3.3.2. Počet závitů.....	13
2.3.3.3. Vícevrstvé induktoři.....	14
2.3.3.4. Vzájemná indukčnost sériových cívek.....	15
2.3.3.5. Velikost induktoru.....	16
2.3.3.6. Vlastní rezonanční frekvence.....	17
2.3.4. Charakteristiky kondenzátoru.....	17
3. PRAKTICKÁ ČÁST.....	18
3.1. Měření indukčnosti.....	18
3.1.1. LDC1614EVM.....	18
3.1.2. Komunikace s LDC.....	19
3.1.2.1. I2C.....	19
3.1.2.2. Komunikace mezi LDC1614 a deskou TI F28379D.....	21
3.1.2.3. Zápis do registrů pomocí I2C.....	22
3.1.2.4. Čtení dat z registrů pomocí I2C.....	25
3.1.3. Úprava vyčtených dat.....	26
3.2. Přesné měření a řízení polohy.....	28
3.2.1. Lineární aktuátor KR20.....	28
3.2.2. Servomotor.....	28
3.2.3. Servoměnič.....	29
3.2.4. Řízení servoměniče.....	31
3.3. Měřicí zařízení.....	33
3.3.1. Zařízení Bluetooth.....	33
3.3.2. Měřicí Induktor.....	33
3.3.3. Target.....	35
3.3.4. Interferometr.....	35

3.3.5.	Konstrukce měřicí soustavy	37
3.4.	Ovládání experimentu.....	38
3.5.	Zpracování dat	39
3.5.1.	První měření	39
3.5.2.	Druhé měření.....	40
3.6.	Zhodnocení měření	42
4.	Závěr.....	44
	Seznam použité literatury	45
	Seznam grafů.....	45
	Seznam zkratk a symbolů	45
	Seznam obrázků	46
	Seznam příloh.....	47

1. ÚVOD

Bezkontaktní měření polohy prostřednictvím moderních sensorů na magneticko-indukčním principu přináší nové možnosti v oblasti měření polohy, vibrací a řízení mechatronických systémů. Stále klesající cena těchto sensorů vede k jejich častému využívání v oblasti mechatronických aplikací. Firma Texas Instruments tyto sensory uvedla poprvé na trh v roce 2013 a jejím prvním zástupcem byl sensor LDC1000. Tyto sensory umožňují měření vzdáleností v rozsahu jednotek milimetrů s mikrometrickým rozlišením a plně digitálním komunikačním interfacem (SPI, I2C). Cena těchto sensorů je v řádu jednotek dolarů a zpřístupňuje tak přesná měření polohy do aplikací, které byly až do nedávna doménou mnohem dražších sensorů.

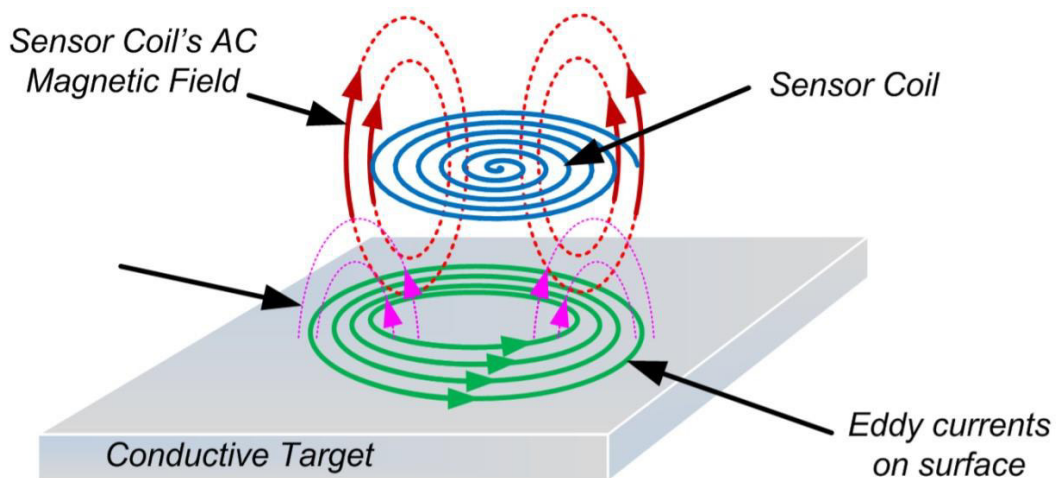
Hlavní náplní této práce je provést evaluaci použitelnosti těchto sensorů pro měření polohy na úrovni mikrometrů a jejich integrace do prostředí Matlab/Simulink. Tato práce se v první (teoretické) části zabývá základním principiálním popisem funkčnosti a vlastností těchto sensorů. V druhé (praktické) části je popsáno jejich propojení s prostředím Matlab/Simulink platformou Launchpad Texas Instruments, včetně testů jejich přesnosti a opakovatelnosti pomocí měření vůči interferometricky odměřované poloze.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Tato část bakalářské práce se zabývá měřením polohy pomocí vířivých proudů. Měření je prováděno pomocí Inductive-to-Digital Converter (dále jen LDC), LDC je převodník, který snímá změnu indukčnosti způsobenou pohybem vodivého předmětu (dále target) ve střídavém magnetickém poli senzoru. Pohyb targetu vzhledem k rovině senzoru může být buď axiální nebo postranní/lineární.

2.1. Vířivé proudy

Kdykoliv je vodič ve střídavém magnetickém poli, indukují se na jeho povrchu vířivé proudy. Podle Lenzova zákona budou indukované vířivé proudy směřovat opačným směrem než magnetické pole které je vyvolalo, to oslabí originální magnetické pole způsobem který jsme schopni změřit. LDC zařízení využívají induktor v rezonačním obvodu pro generování střídavého magnetického pole, jak je vidět na Obrázku 1. Generované vířivé proudy oslabí magnetické pole induktoru, což způsobí snížení indukčnosti rezonančního obvodu, která je detekovaná pomocí LDC. V závislosti na zařízení měří LDC buď změnu rezonance a/nebo energetickou ztrátu v rezonačním obvodu a v targetu (způsobenou vířivými proudy). [1]



Obrázek 1 Vzájemné působení střídavého magnetického pole a vodiče [Zdroj: [1]]

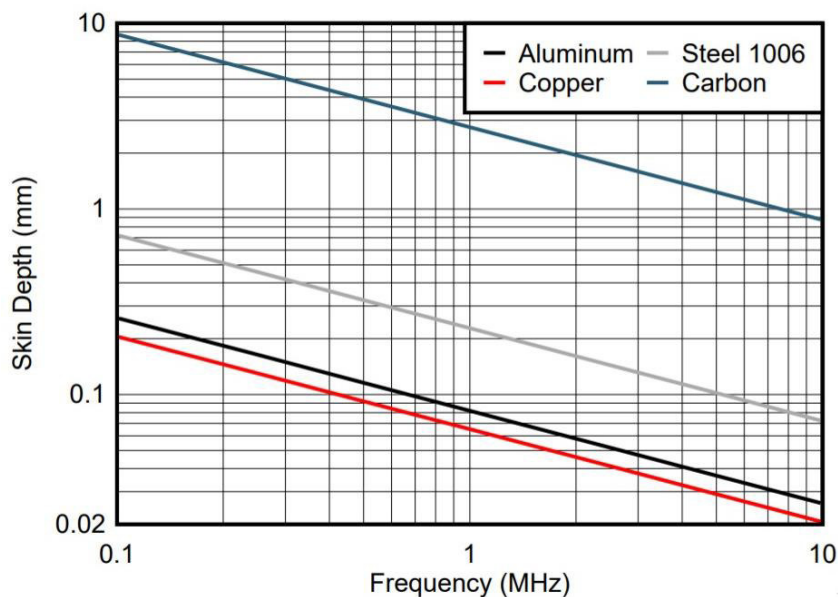
2.1.1. Hloubka vniku (Skin depth)

Vířivé proudy indukované magnetickým polem LDC senzoru tečou blízko povrchu vodiče a s přibývajícím hloubkou snižují svojí amplitudu. Útlum proudu má exponenciální průběh. Hloubka vniku (skin depth) δ je vzdálenost, ve které je proud snižen na $\frac{1}{e}$ (37%) z hodnoty na povrchu. Každé další zvýšení vzdálenosti od povrchu o δ má za následek další snížení o $\frac{1}{e}$ z předchozí hodnoty. [1]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

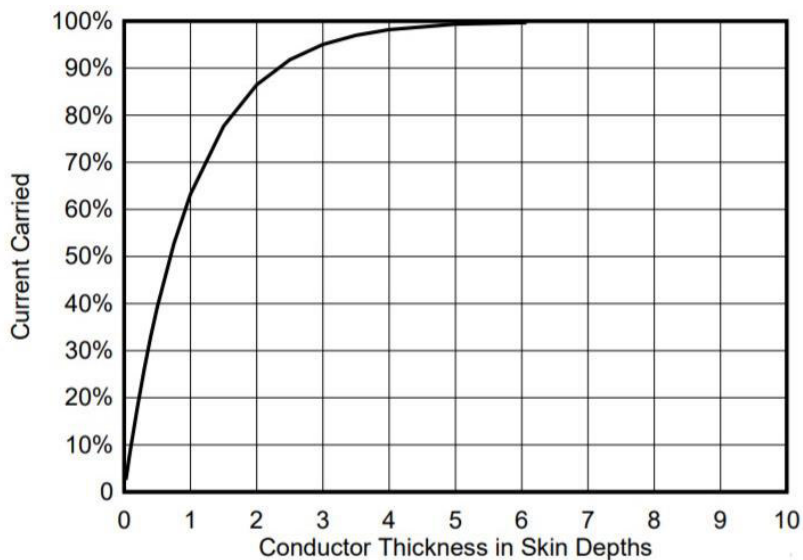
- μ je magnetická permeabilita materiálu, permeabilita vakua μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$) vynásobená relativní permeabilitou vodiče,
- ρ je rezistivita vodiče, a
- f je frekvence střídavého magnetického pole

Hloubka vniku se liší podle materiálu vodiče a frekvence senzoru. Při vyšších frekvencích se hloubka vniku zmenšuje, což vede ke koncentrování vířivých proudů na povrchu vodiče. Slabší vodiče např. uhlík mají vyšší hodnotu hloubky vniku. Porovnání některých vodičů je vidět na Grafu 1. [1]



Graf 1 Hloubka vniku (skin depth) v závislosti na frekvenci pro různé vodiče [Zdroj: [1]]

Vodič/Target s tloušťkou odpovídající jedné hloubce vniku pro danou frekvenci bude přenášet pouze 63,2 % proudu v porovnání s vodičem nekonečné tloušťky. Pro target o tloušťce tří hloubek vniku bude množství indukovaného proudu 95 %. Průběh této závislosti je ukázán na Grafu 2 [1]



Graf 2 Indukovaný proud v závislosti na tloušťce vodiče [Zdroj: [1]]

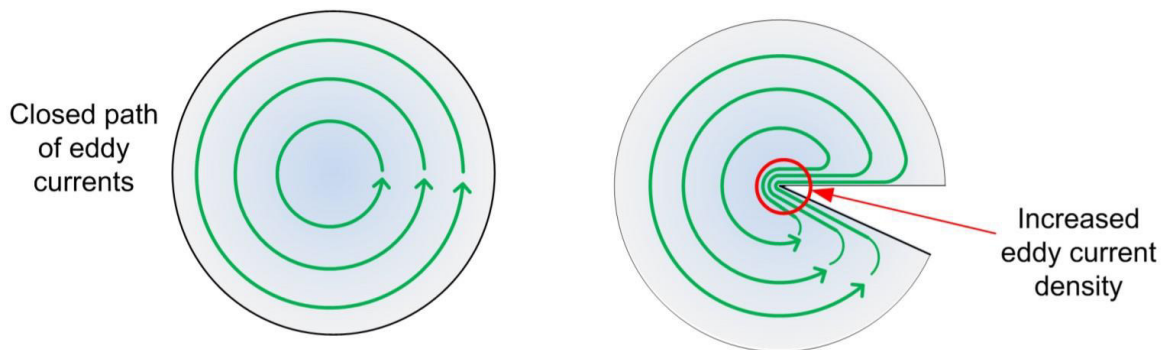
Pro dosažení nejlepšího výkonu by měla být tloušťka materiálu alespoň 2 až 3 hloubky vniku. Toho můžeme dosáhnout zvětšením tloušťky targetu nebo zvýšením frekvence senzoru. [1]

2.2. Specifikace targetu

Při volbě vhodného targetu pro danou aplikaci nezávisí pouze na jeho tloušťce. Velkou roli hrají jeho tvar nebo materiál ze kterého je vyroben.

2.2.1. Tvar targetu

Protože vířivé proudy tečou na povrchu targetu v uzavřených smyčkách, jakákoliv diskontinuita v proudových drahách vede k vyššímu šumu měření. Pokud má target nějaké trhliny nebo dutiny, vířivé proudy na povrchu targetu budou muset téct okolo těchto poruch, jak je vidět na obrázku 2. [1]



Obrázek 2 Tok proudu v jednotném povrchu a v povrchu s trhlinou [Zdroj: [1]]

Tento nesoulad v drahách vířivých proudů a proudů v cívice senzoru oslabuje spojení mezi targetem a senzorem. Výsledkem je menší posun indukčnosti senzoru a tím nižší rozlišení. [1]

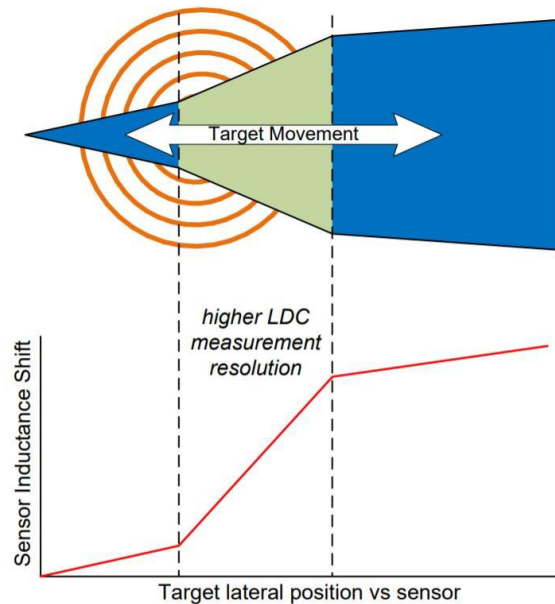
2.2.1.1. Postranní/lineární tvar targetu

Některé aplikace jsou navrženy tak, aby namísto axiálního posunu snímaly boční směr pohybu targetu vzhledem k senzoru. Pro tyto aplikace je target držen v pevné vzdálenosti od senzoru a pohybuje se bočně nad nebo pod ním. Tvar targetu používaný pro tuto aplikaci je vidět na obrázku 3. [1]



Obrázek 3 Boční/Lineární tvar targetu nad senzorem [Zdroj: [1]]

Tvar targetu může být upraven tak, aby produkoval lepší rozlišení ve specifické oblasti. Obrázek 4 ukazuje příklad takovéto konfigurace. V tomto případě bude LDC schopno měřit ve střední části targetu (s vyšším přírůstkem plochy na jednotku délky) s vyšším rozlišením. [1]



Obrázek 4 Boční /Lineární target s proměnným profilem [Zdroj: [1]]

Tato metoda může být také využita pro měření úhlového pohybu.

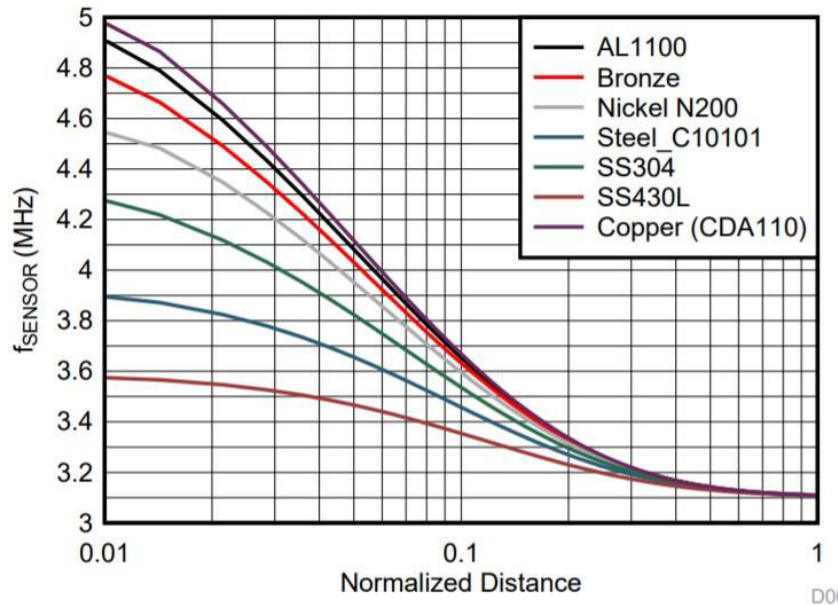
2.2.2. Materiál targetu

2.2.2.1. Vlastnosti ideálního materiálu targetu

Z elektrického hlediska musí mít ideální materiál pro indukční měření nejvyšší možnou vodivost. Vyšší vodivost vede k větším vířivým proudům. Ty generují silnější protisměrné magnetické pole, které vede ke většímu posunu indukčnosti senzoru. Ta může být následně změřena s vyšším rozlišením. Z tohoto hlediska je nejlepším materiálem pro svoji vysokou vodivost stříbro. Nicméně jeho ostatní vlastnosti, jako například cena, značně omezují jeho využitelnost. [1]

Z mechanického hlediska by měl být materiál fyzicky stabilní a nemělo by docházet k jeho deformacím jako je naklápění nebo zvlnění. Jakákoliv deformace by byla nesprávně vyhodnocena jako změna polohy. Ze stejného důvodu musí být koeficient tepelné roztažnosti materiálu co nejnižší, aby změna efektivní polohy targetu se změnou teploty byla minimální. [1]

Graf 3 ukazuje změny frekvence senzoru v závislosti na poloze targetu pro různé materiály. Pro měření výhodné operovat s velkými frekvenčními posuny; LDC je tak může vyhodnotit s vyšším rozlišením.



Graf 3 Porovnání posunu frekvence senzoru v závislosti na vzdálenosti pro různé materiály targetu [Zdroj: [1]]

Data použitá v grafu 3 byla naměřena kruhovým senzorem o průměru 14 mm s rezonancí elektromagnetického obvodu o frekvenci 3,11 MHz. Osa x reprezentuje vzdálenost targetu od senzoru v měřítku reprezentující průměr senzoru (hodnota 0,1 na ose x odpovídá vzdálenosti 1,4 mm). [1]

2.2.2.2. Hliník

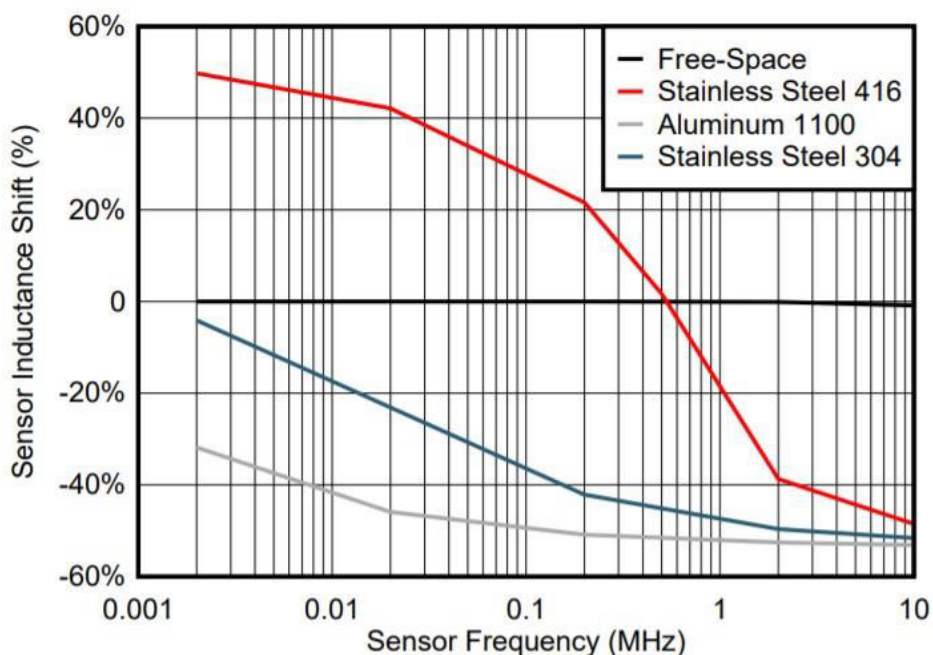
Hliník je vynikajícím materiálem pro výrobu targetu. Mezi jeho přednosti patří hlavně jeho nízká cena, snadná obrobitelnost a odolnost vůči korozi. Hloubka vniku δ dosahuje jen o 25% vyšších hodnot než měď. Zároveň má mírně nižší teplotní koeficient roztažnosti (hliník 4200 ppm/°C, měď 4300 ppm/°C). Povrchové úpravy hliníku jsou silné jen několik mikronů, takže nijak neovlivňují výkonost hliníkových targetu. [1]

2.2.2.3. Měď

Z hlediska vodivosti je měď výborný targetový materiál. Jeho vodivost odpovídá přibližně 95% vodivosti stříbra. Na druhou stranu je těžší a měkčí než hliník, což ho z mechanického hlediska činí nevhodným pro některé aplikace. Některé jeho slitiny mohou mít dokonce menší vodivost hliník. [1]

2.2.2.4. Ocel a magnetické materiály

Oceli a magnetické materiály se také dají využít pro výrobu targetů, ale jejich aplikace s sebou nese několik úskalí. Magnetické oceli, například nerezová ocel 416, mají velmi odlišnou odezvu pro různé frekvence senzoru, než jsme zvyklí u jiných materiálů, (graf 4). Toto chování je způsobeno prostupem siločar magnetického pole senzoru skrz ocel, to vede ke zvýšení celkové indukčnosti senzoru, což je opačný mechanismus než u ostatních materiálů. Při vyšších frekvencích se hloubka vniku δ stává dostatečně malou na to, aby na povrchu generované vířivé proudy zabránily magnetickým siločárám ve vstupu do kovu. Pro tyto vyšší frekvence má změna indukčnosti stejný průběh jako u jiných materiálů. Aplikace využívající tyto targety by měly operovat s frekvencemi senzoru $f_{\text{senzor}} < 20\text{kHz}$ nebo $f_{\text{senzor}} > 1\text{MHz}$. [1]



Graf 4 Změna indukčnosti pro různé materiály targetu v závislosti na frekvenci senzoru [Zdroj: [1]]

2.3. Specifikace senzoru

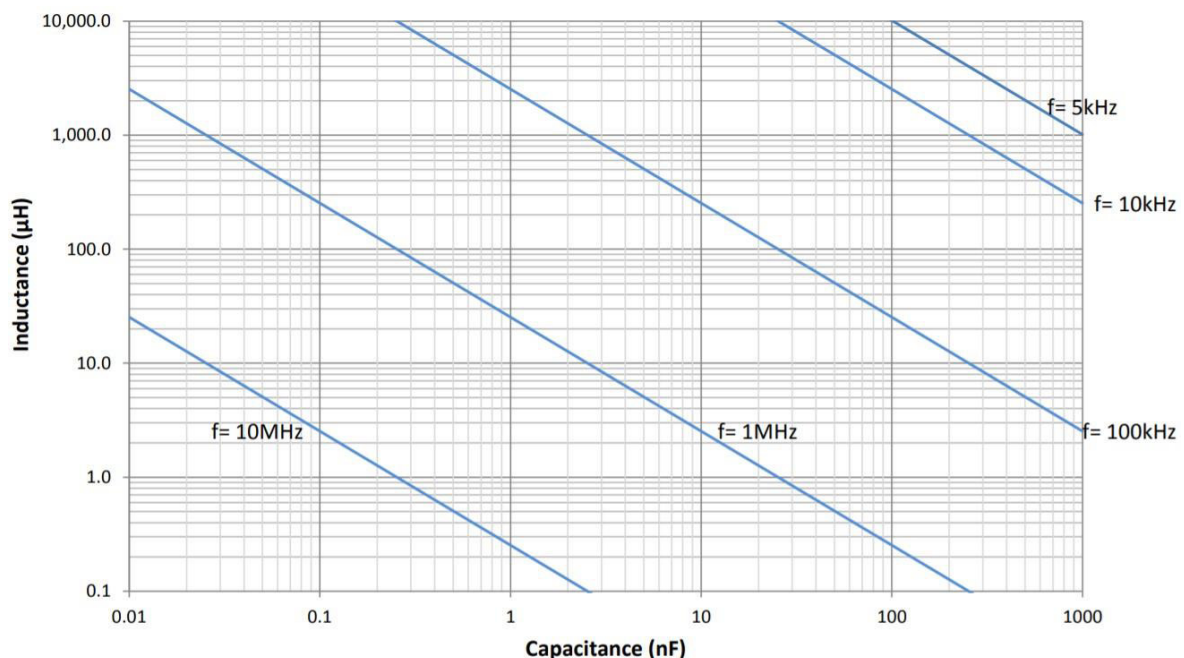
Pro dosažení nejlepších výsledků při použití LDC je potřeba zvolit senzor vhodný pro danou aplikaci. Senzor je tvořen induktorem/cívkou paralelně spojenou s kondenzátorem což vytváří LC oscilační obvod. [2]

2.3.1. Frekvence senzoru

Induktance cívky a kapacitance kondenzátoru určují přirozenou frekvenci senzoru.

$$f_{SENZOR}(Hz) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Na grafu 5 je ukázáno několik frekvencí v závislosti na hodnotách cívky a kondenzátoru. Například 1MHz senzor může používat kondenzátor s hodnotou 1 nF a cívku s přibližně 25 μ H [2]



Graf 5 Frekvence senzoru v závislosti na kapacitanci a indukčnosti [Zdroj: [2]]

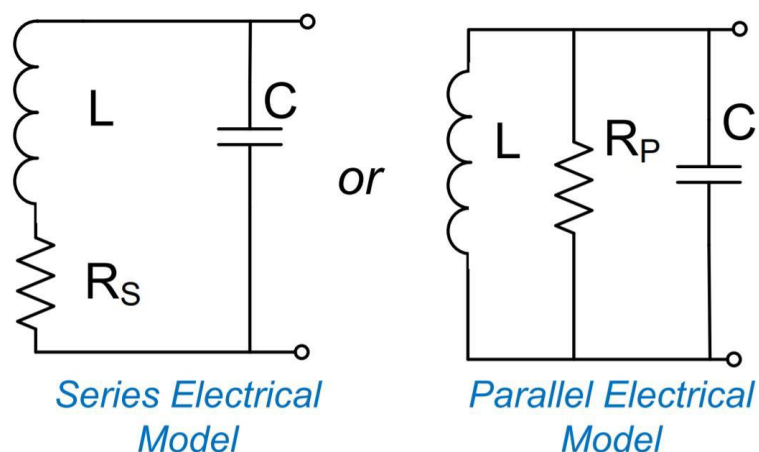
LDC zařízení mohou operovat na širokém rozsahu frekvencí. Rozsah frekvencí se liší podle typu zařízení. (LDC 1312 – od 1kHz do 10MHz, LDC1000 pouze na rozsahu od 5kHz do 5MHz). Je důležité pamatovat na to, že frekvence senzoru se mění v závislosti na pozici targetu. Nejvyšší frekvence senzoru, když je target nejbližší, nesmí nikdy překročit rozsah pro dané LDC zařízení. [2]

2.3.2. R_s and R_p

V indukčním senzoru se vyskytují odporové ztráty, které nepříznivě ovlivňují měření. Tyto ztráty jsou dvojího původu – energie rozptýlená v targetu nebo v jiném blízkém vodiči a ztráty způsobené vinutím cívky. [2]

Na obrázku 5 jsou vidět dvě metody elektrického znázornění těchto ztrát sériovým nebo paralelním modelem. Pro sériovou reprezentaci platí, že čím vyšší je R_s tím jsou vyšší parazitní ztráty a tím více energie potřebuje LDC pro udržení oscilace. Tento model odpovídá fyzikálnímu chování systému mnohem více než paralelní model. Pro paralelní model je snazší určit jaký proud je potřeba pro dané špičkové napětí snímače. [2]

Pokud je R_s příliš vysoké (to samé, pokud je R_p příliš nízké) LDC nemusí být schopno efektivně řídit senzor, což vede ke zvýšení šumu nebo dokonce k selhání oscilace senzoru.



Obrázek 5 Sériová a Paralelní reprezentace ztrát [Zdroj: [2]]

2.3.2.1. Povrchový jev (Skin effect)

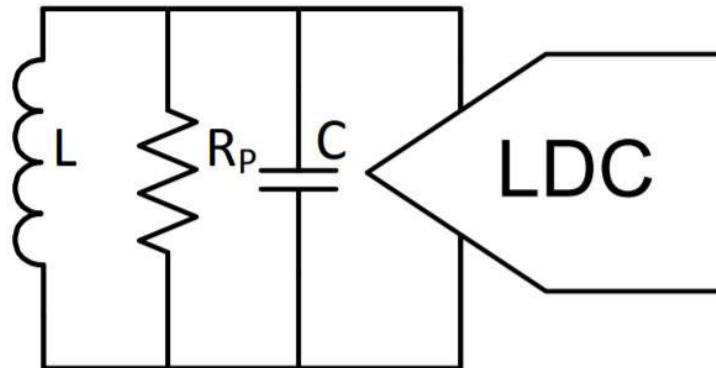
Na rozdíl od stejnosměrného proudu, kde se proud přenáší celým průřezem vodiče, se u střídavého proudu většina toku uskutečňuje jen těsně pod povrchem vodiče. Tento jev se nazývá povrchový jev (Skin effect) a značně závisí na vodivosti materiálu a na frekvenci střídavého proudu. U měděného vodiče připojeného na zdroj o frekvenci 1MHz teče 95% proudu ve slupce tlusté jen 0,2 mm od povrchu. Pro frekvenci 10MHz je tato vrstva silná pouze 0,06 mm. [2]

Povrchový jev je pro vyšší frekvence hlavní příčinou růstu odporu R_s . Tento efekt také ovlivňuje vířivé proudy vznikající na povrchu targetu (hloubka vniku).

2.3.3. Charakteristiky induktoru

Pro lepší pochopení vlastností senzoru jej musíme rozdělit na cívku (induktor) a kondenzátor

Na obrázku 6 je ukázán paralelní LRC model senzoru

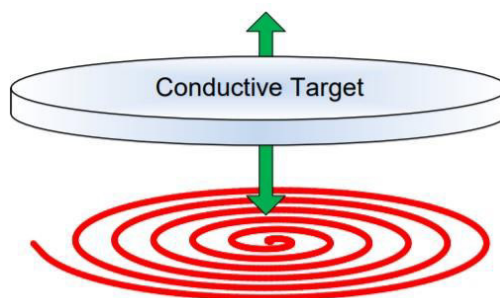


Obrázek 6 RLC model [Zdroj: [2]]

2.3.3.1. Tvar cívky/induktoru

Nejdůležitější charakteristikou cívky je její tvar. Ten totiž určuje tvar generovaného magnetického pole. Nejvíce symetrické magnetické pole vytvářejí kruhové cívky. Zároveň se jedná o nejlepší tvar z hlediska porovnání indukčnosti a R_s . To dělá z kruhových cívek nejpoužívanější tvar induktoru. Pokud jsou na aplikaci kladeny speciální požadavky, dají se využít jiné tvary cívek více vyhovující daným specifikacím měření. [2]

Pro všechny aplikace, ve kterých je target posunován kolmo k rovině snímače, je vhodným tvarem právě kruhový induktor, znázorněn na obrázku 7.



Obrázek 7 Axiální posuv s kruhovým induktorem [Zdroj: [2]]

Kruhový induktor má nejvyšší tzv. faktor kvality (Q, quality factor). Q faktor se vypočítá jako:

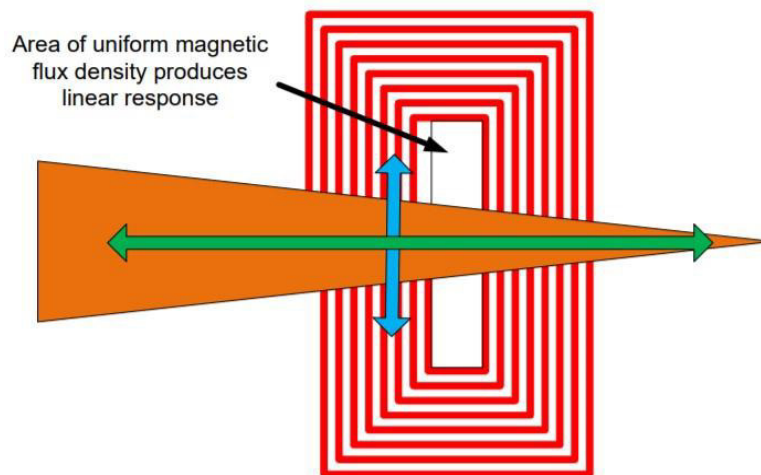
$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{X_L}{R}$$

Kde

- ω je frekvence střídavého proudu,
- L je indukčnost cívky
- R je odpor vinutí (pro stejnosměrný proud)
- X_L je induktance cívky pro danou frekvenci

Faktor kvality cívky je poměr její induktance k jejímu odporu a vypovídá o její účinnosti. Čím vyšší je faktor kvality tím více se chování cívky podobá ideální cívce.

Pro jiné aplikace se můžou lépe hodit jiné tvary cívek. Například pokud potřebujeme přesné snímání polohy na ose x, ale sníženou citlivost na ose y, nejlepších výsledků dosáhneme použitím obdélníkové cívky, jak je ukázáno na obrázku 8. [2]

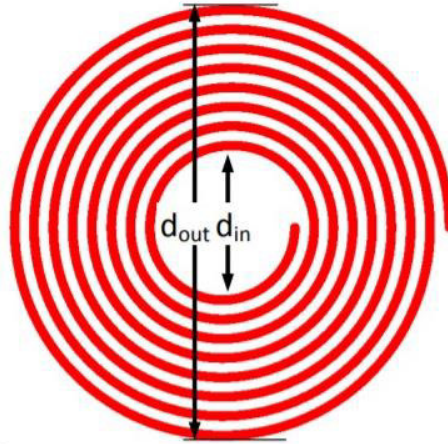


Obrázek 8 Obdélníková cívka necitlivá na posun v ose y [Zdroj: [2]]

Je potřeba pamatovat na skutečnost, že nekruhové cívky budou mít vždy nižší Q a vyšší R_s pro stejnou hodnotu indukčnosti.

2.3.3.2. Počet závitů

Další důležitou charakteristikou cívky je její počet závitů. Ten totiž určuje její celkovou indukčnost. [2]



Obrázek 9 Plochá spirální kruhová cívka [Zdroj: [2]]

Mohanova rovnice je užitečný nástroj pro porozumění, jak spolu souvisí geometrie cívky a její indukčnost. Tato rovnice se dá využít pro výpočet celkové indukčnosti cívek různých geometrií. [2]

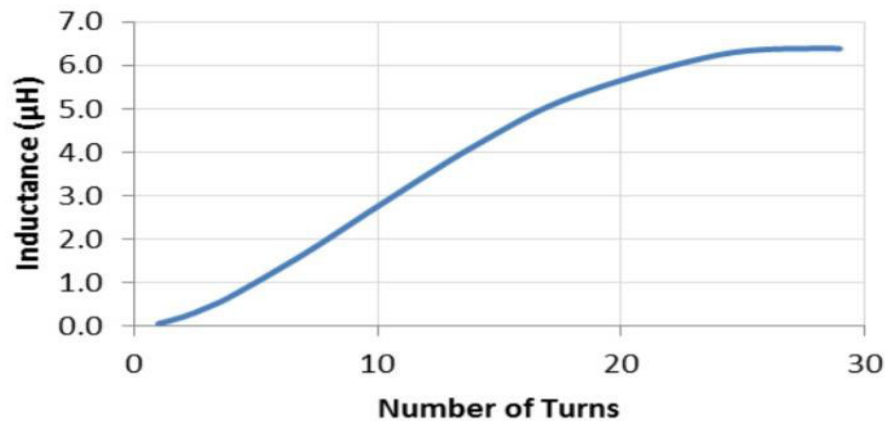
$$L = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{str} c_1}{1 + K_2 \rho} \left(\ln \frac{c_2}{\rho} + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right)$$

Kde

- K_1 a K_2 jsou závislé na tvaru cívky
- μ_0 permeabilita vákua, $4\pi \cdot 10^{-7}$
- n je počet závitů cívky
- d_{str} je střední průměr závitů $= (d_{out} + d_{in})/2$
- $\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}}$ představuje výplňový poměr induktoru
- c_i jsou úpravy založené na geometrii (pro kružnici jsou hodnoty $c_1=1,0$, $c_2=2,46$, $c_3=0$, $c_4=0,20$)

Celková indukčnost je úměrná počtu závitů. Musíme, ale dávat pozor na případ, kdy přidáváme vnitřní závity (což zmenšuje vnitřní průměr). Tím se zmenší d_{str} , což sníží dodatečnou indukčnost získanou přidáním závitů. Z hlediska kvality cívky Q by měl být poměr d_{in}/d_{out} větší než 0,3. [2]

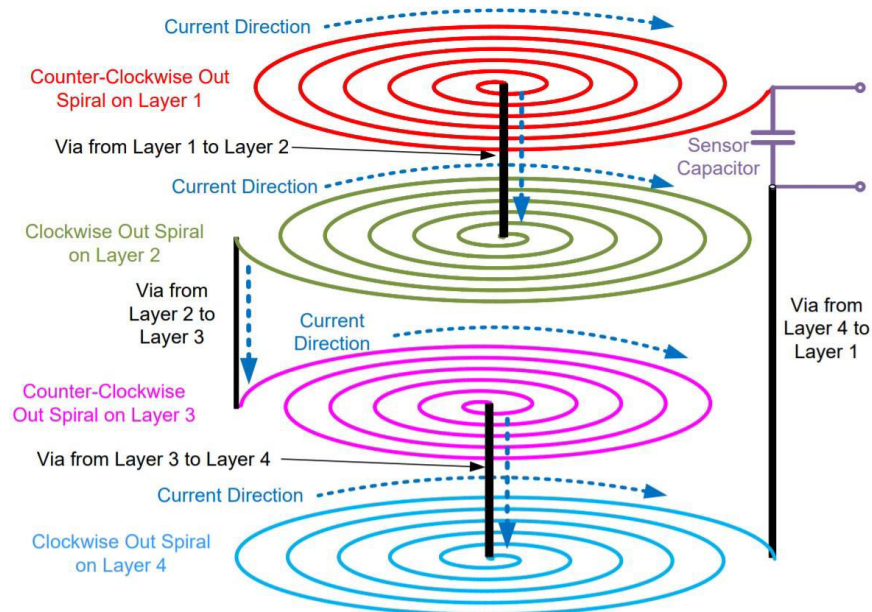
V grafu 6 můžeme vidět závislost indukčnosti na počtu závitů u cívky s průměrem 18 mm a s šířkou stopy vodiče a mezery 0,15 mm. Nejvíce indukčnosti přidává prvních cca 15 závitů. S rostoucím počtem závitů klesá jejich přídavek k celkové indukčnosti. [2]



Graf 6 Indukčnost v závislosti na počtu závitů pro 18 mm kruhovou cívku [Zdroj: [2]]

2.3.3.3. Vícevrstvé induktory

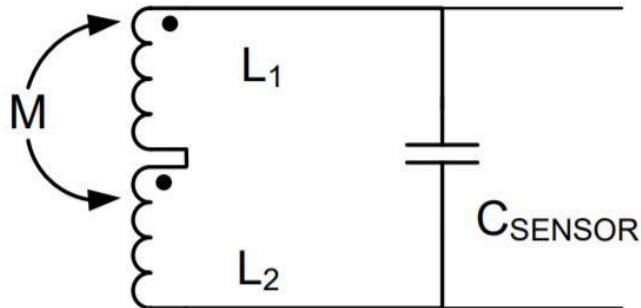
Induktory zabudované v desce plošných spojů (DPS, v angličtině PCB) jsou limitovány maximálním počtem závitů, které mohou mít v daném průměru. Příliš malou indukčnost takto limitované cívky je možné zvýšit přidáním dodatečných induktorů do dalších vrstev. Jak je ukázáno na obrázku 10 cívky musí být srovnány pod sebou a propojeny tak, aby proud, který jimi prochází, tekł na stejnou stranu (po směru/protisměru hodinových ručiček) ve všech cívkách stejně. Díky tomu se magnetické pole vytvořené cívkami sčítá. [2]



Obrázek 10 Konstrukce vícevrstvého induktoru [Zdroj: [2]]

2.3.3.4. Vzájemná indukčnost sériových cívek

Při použití vícevrstvého induktoru podle obrázku 10, se jejich magnetická pole sčítají což vede ke zvýšení celkové indukčnosti. Na obrázku 11 je vidět ekvivalentní model pro dvě cívky. [2]



Obrázek 11 Vzájemná indukce pro dvouvrstvý induktor [Zdroj: [2]]

Celková indukčnost se vypočítá podle vztahu:

$$L_{celk} = L_1 + L_2 + 2M$$

Kde

- L_1 je indukčnost cívky 1
- L_2 je indukčnost cívky 2, většinou $L_1 = L_2$ díky stejné geometrii
- M je vzájemná indukčnost mezi cívkami = $k * \sqrt{L_1 L_2}$

Parametr k je měřítkem vazby mezi cívkami. Závisí pouze na vzdálenosti mezi cívkami a nabývá hodnot v rozmezí 0 až 1.

Pro N vrstvý induktor je celková indukčnost dána podle vztahu:

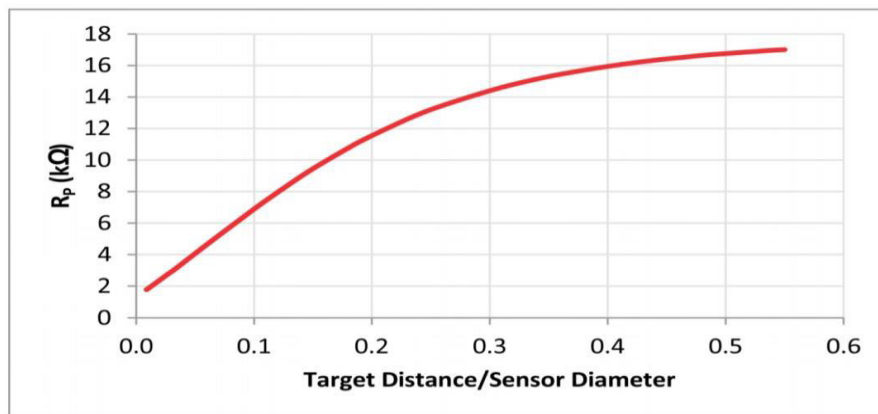
$$L_{celk} = \sum_{i=1}^N L_i + \left(\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{m=j+1}^N M_{j,m} \right)$$

Vzájemná indukčnost nevzniká jenom mezi sousedními cívkami, ale i s ostatními. To dokáže celkovou indukčnost velmi navýšit.

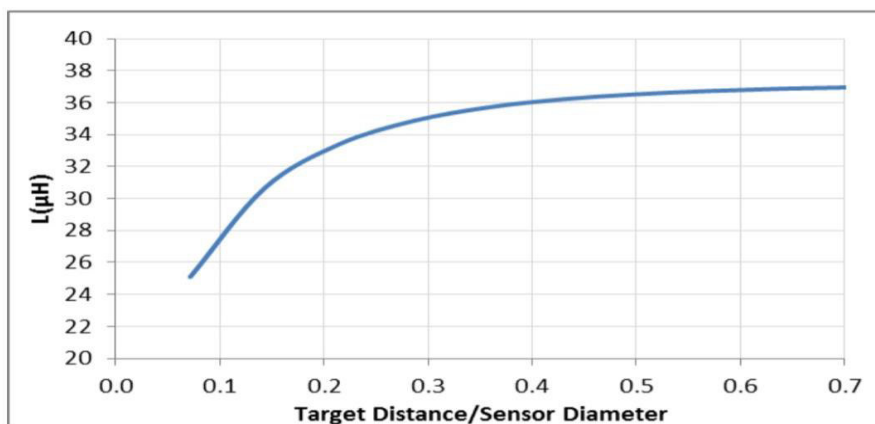
Například cívka s průměrem 18 mm, 12 závitů a šířkou stopy vodiče a mezery 0,15mm má indukčnost 3,5 μH . Celková indukčnost při konstrukci čtyřvrstvého induktoru z těchto cívek a DPS o tloušťce 1,0 mm není 4*3,5 μH (14 μH) ale 39 μH . Tech dodatečných 25 μH pochází právě ze vzájemné indukce. Výhodou takto získané indukce je že nezvyšuje R_s senzoru. [2]

2.3.3.5. Velikost induktoru

Velikost induktoru hraje zásadní roli. Určuje totiž velikost generovaného magnetického pole a tím přímo ovlivňuje jeho snímací rozsah. Konkrétně jde pouze o jeho vnější průměr (d_{OUT}), čím je větší, tím má induktor větší dosah. Je překvapující, že celková indukčnost senzoru, která koresponduje s intenzitou magnetického pole, nijak výrazně neovlivňuje snímací rozsah. Průběhy závislostí indukčnosti senzoru na vzdálenosti targeru má velmi podobné tvary pro různé druhy induktorů. Tento tvar je tak konzistentní, že při vztažení na vnější průměr cívky (d_{OUT}) jej můžeme použít pro jednodušší návrh systému. Graf 7 a 8 ukazuje přechodové funkce pro kruhový induktor o průměru 14 mm. Při použití jiné geometrie induktoru by grafy měly jiné měřítko na ose y, ale celkový tvar by byl stejný. S klesající vzdáleností mezi senzorem a targetem klesají jak Indukčnost (L) tak R_p . Míra poklesu je dána velikostí a materiálem targetu. Některé materiály mohou s klesající vzdáleností dokonce zvyšovat hodnoty L a R_p . (viz. Kapitola 2.3.3) [2]



Graf 7 Závislost R_p na vzdálenosti vztažené na průměr (pro $d_{OUT} = 14$ mm) [Zdroj: [2]]



Graf 8 Závislost Indukčnosti na vzdálenosti vztažené na průměr (pro $d_{OUT} = 14$ mm) [Zdroj: [2]]

2.3.3.6. Vlastní rezonanční frekvence

Obrázek 12 ukazuje, jak jsou závity induktoru vzájemně odděleny dielektrikem. To produkuje malé parazitické kondenzátory mezi každým závitem. Při dostatečně vysokých frekvencích je pro signál jednodušší přeskočit přes parazitické kondenzátory než projít celou délkou vinutí. Frekvence, kdy k tomuto jevu dochází, se nazývá vlastní rezonanční frekvence a je označována jako f_{SR} nebo SFR. Protože provoz v oblasti s parazitickými kondenzátory není stabilní, je doporučeno držet frekvenci senzoru pod 75% SRF. [2]



Obrázek 12 Parazitické kondenzátory v induktoru [Zdroj: [2]]

2.3.4. Charakteristiky kondenzátoru

Kondenzátor použitý ve snímači je velmi důležitá, avšak často přehlížená součástka. Obecně je doporučeno používat pro LCD aplikace kondenzátory s označením COG (NPO). Tyto kondenzátory využívají nejkvalitnější keramické dielektrikum a díky tomu jsou velmi stabilní a nezatěžují je neduhy jiných méně kvalitních dielektrik.

Mezi jejich přednosti patří:

- nejsou polarizované
- nízká změna kapacity při stárnutí
- vynikající tepelná stabilita,
- velmi nízká hodnota ESR (ekvivalentní sériový odpor)
- nevykazují žádné piezoelektrické jevy
- mohou pracovat při velmi vysokých frekvencích

Oproti jiným dielektrikům mají však malé množství kapacity na jednotku objemu, takže je obtížné najít kondenzátory COG s kapacitou větší než 0,47 uF. V LDC snímačích se používají kondenzátory s kapacitou od 47 pF do 3300 pF. Pro tyto hodnoty kapacity jsou kondenzátory COG za rozumnou cenu a ve vyhovující velikosti [2]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

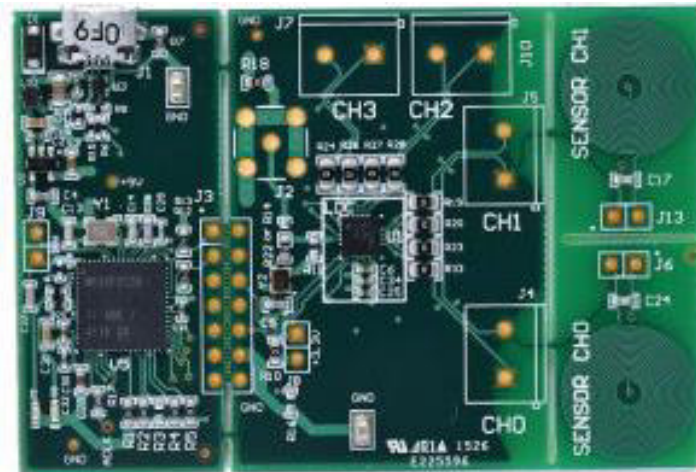
V této části bakalářské práce budu popisovat samotnou realizaci měření pomocí LDC1614 a následné zpracování dat. Podstatou mého experimentu je proměřování změny indukčnosti cívky v závislosti na poloze targetu. Experiment jsem rozdělil na několik částí, které budu popisovat samostatně. Pro jednoduchost jsem práci rozdělil na měření indukčnosti, řízení polohy targetu, ovládání, konstrukci měřícího zařízení a zpracování dat.

3.1. Měření indukčnosti

Ve své aplikaci pro měření indukčnosti využívám senzor LDC1614EVM. Senzor je připojen k desce TI F28379D od firmy Texas Instruments, která zpracovává data a posílá je přes Bluetooth do počítače.

3.1.1. LDC1614EVM

LDC1614EVM (LDC1614 Evaluation Module) je výrobek firmy Texas Instruments, který využívá technologie indukčního měření pro snímání a měření přítomnosti, měření polohy nebo složení targetu. Modul obsahuje převodník LDC1614, který disponuje až čtyřmi měřicími kanály. Dvě měřicí cívky jsou připojeny na kanály CH0 a CH1 a dále k chipu LDC1614. Komunikace mezi měřícím modulem LDC1614 a mikrokontrolerem MSP430 je realizována prostřednictvím komunikační sběrnice I2C. Na obrázku 13 je zobrazen kompletní zkušební modul LDC1614EVM určený pro základní testování funkčnosti bezkontaktního měření pomocí chipu LDC1614. Z toho důvodu je modul na dvou místech perforovaný, což jej umožňuje rozdělit na 3 části. První perforace se nachází mezi cívkou senzoru a čipem LDC1614. Díky tomu je možné odlomit a nahradit cívku senzoru jinou cívkou. Druhá perforace je umístěna mezi LDC1614 a mikrokontrolerem MSP430. Po odlomení MSP430 je možné s LDC komunikovat pomocí jiného mikrokontroleru. Místa perforací jsou vidět na obrázku 13.



Obrázek 13 LDC1614EVM

3.1.2. Komunikace s LDC

Pro evaluaci funkčnosti celého modulu poskytuje Texas Instruments softwarovou aplikaci „Sensing Solutions EVM GUI“, propojení s PC je realizováno prostřednictvím USB. Program umožňuje monitorovat indukci senzoru a přepisovat parametrizační registry čipu LDC1614. Tento program však neumožňuje reálnotimové ukládání měřených dat a je tak vhodný především pro základní otestování a parametrizaci čipu.

Z výše uvedených důvodů jsem se rozhodl oddělit mikrokontroler MSP430 a veškerou komunikaci s LDC realizovat přes I2C protokol prostřednictvím desky TI F28379D Launchpad.

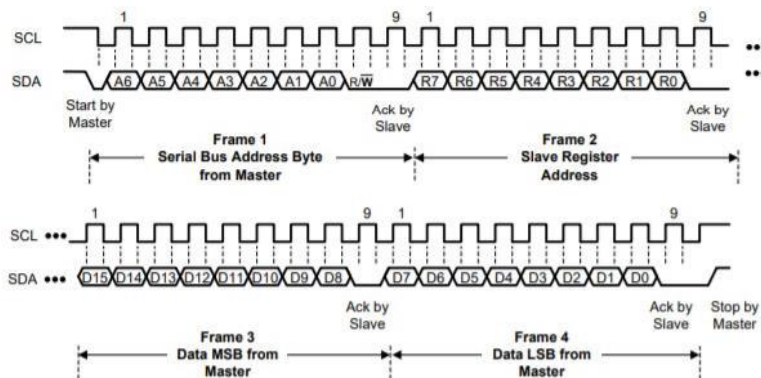
3.1.2.1. I2C

Měřicí čip LDC1614 používá pro přístup do svých řídicích a datových registrů sběrnici I2C. Tato sběrnice využívá dvou vodičů. První slouží pro přenos hodinového signálu SCL (Synchronous Clock) a druhý jako datový kanál SDA (Synchronous Data). Sběrnice umožňuje propojení až 128 zařízení, která jsou rozdělena na dva typy: Master, který je ve sběrnici jen jeden, a Slave, každý se svojí přidělenou 7bitovou adresou. Při jakémkoli přenosu dat generuje Master hodinový signál na vodiči SCL. Když jedno zařízení vysílá, všechna ostatní přijímají a pouze podle 7bitové adresy poznají, zda jsou data určena jim. Pokud chce zařízení přijmout nebo vyslat data musí nejdříve definovat adresu zařízení se kterým chce komunikovat a zda půjde o zápis nebo čtení dat. To zajišťuje R/W (read 1/write 0) bit, poslaný společně s adresou.

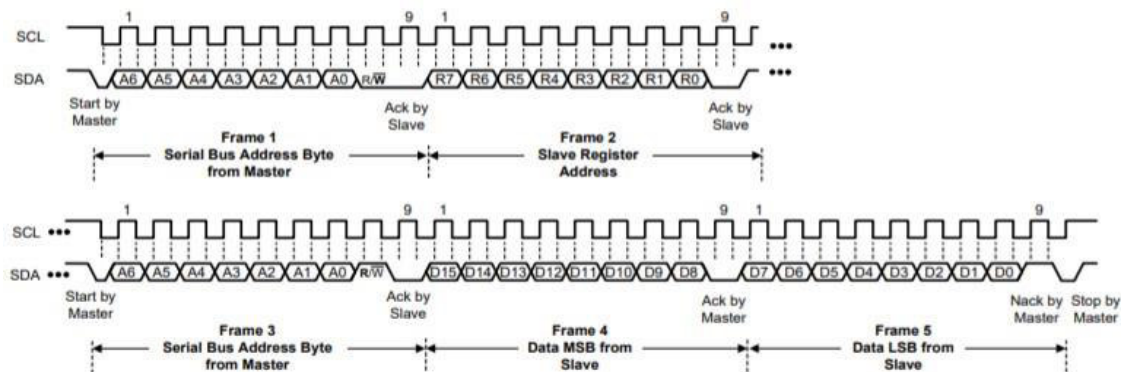
Přenos dat probíhá kombinací těchto sekvencí:

- Stav klidu – Je zajištěn logickými jedničkami na obou vodičích, které jsou vytvořeny pomocí pull-up rezistorů (rezistory mezi vodičem a napájecím napětím).
- Start bit – Zahajuje přenos. Je vygenerován změnou úrovně SDA z 1 na 0 zatímco je SCL v logické 1.
- Stop bit – Ukončuje přenos. Logická úroveň SDA je změněna z 0 na 1 zatímco je SCL v logické 1.
- Přenos dat – Data nebo adresa Slave + R/W bit jsou přenášena po 8 bitech od nejvyššího po nejnižší. Logická úroveň SDA se mění pouze v případě, že je SCL v logické 0. Při každém SCL pulzu je přenesen jeden bit.
- Potvrzující Ack bit (acknowledge) – Tento bit je odeslán zařízením, které přijímalo data a slouží jako potvrzení správného přenosu dat. Pokud přenos proběhl v pořádku tak odešle logickou 0. Pokud přenos selže odešle logickou 1.

Na obrázcích 14 a 15 můžeme vidět sekvenci pro zápis a čtení z registru zařízení.



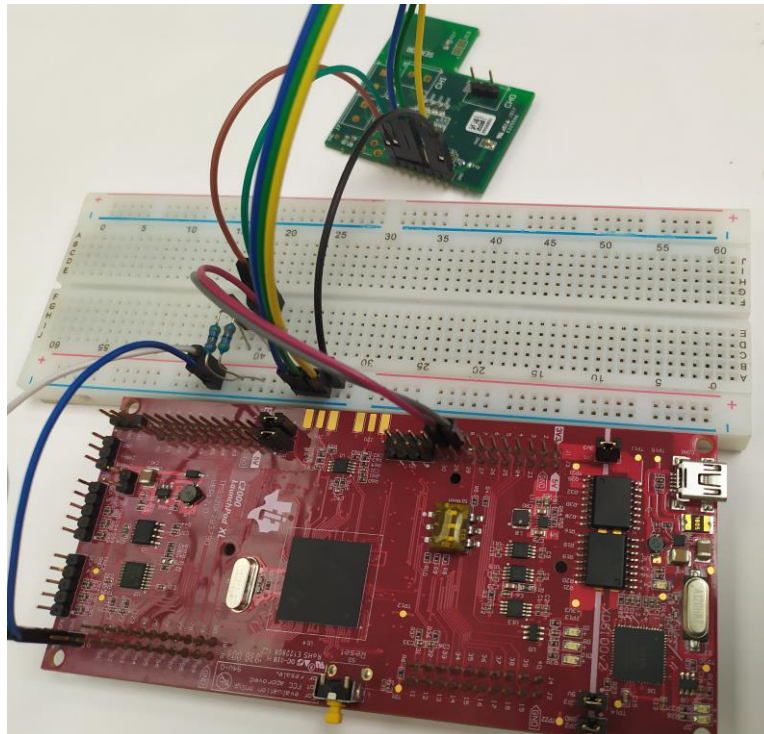
Obrázek 15 I2C – Sekvence zápisu do registru [Zdroj: [3]]



Obrázek 14 I2C – Sekvence čtení z registru [Zdroj: [3]]

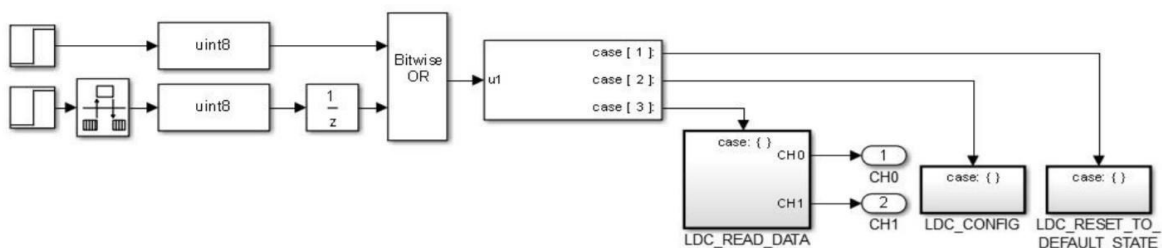
3.1.2.2. Komunikace mezi LDC1614 a deskou TI F28379D

Jak je popsáno výše pro komunikaci mezi LDC1614 a deskou TI F28379D (dále TI) jsem použil sběrnici I2C. Zapojení je vidět na obrázku 16.



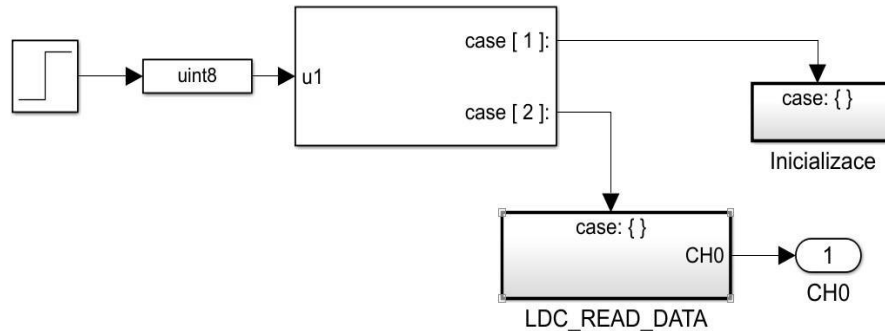
Obrázek 16 Propojení LDC1614 a TI F28379D

Desku jsem programoval pomocí programu Matlab/Simulink. Odrazovým můstkem pro mojí práci byl dokument „Vnorený sensorický systém polohy magneticky levitujícího hriadeľa“ od Ing. Kozakoviče, ve kterém zprovoznil komunikaci mezi LDC1614 a mikrokontrolérem TI F28335. Na obrázku 17 je vidět příslušné blokové schéma. Jeho program se skládal ze tří fází: Resetování LDC, konfigurace registrů a samotné měření dat. Pořadí těchto fází zajišťoval SwitchCase block. Podle jeho vstupní hodnoty u1 (1, 2, 3) bylo určeno, který z výstupů SwitchCase bloku mělo být aktivní.



Obrázek 17 Bloková schéma komunikace mezi LDC1614 a TI F28335 [Zdroj: [4]]

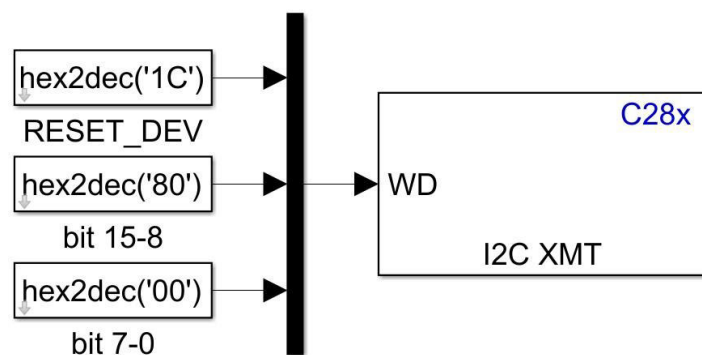
Ve své práci jsem schéma zjednodušil spojením fáze Reset a Konfigurace registrů. Výsledné schéma je vidět na obrázku 18.



Obrázek 18 Blokové schéma komunikace mezi LDC1614 a TI F28379D

3.1.2.3. Zápis do registrů pomocí I2C

Zápis přes I2C je realizován pomocí bloku I2C XMT. Uvnitř bloku je nastavena 7 bitová adresa určující komunikační adresu příslušnou danému zařízení (typu Slave). V tomto konkrétním případě $2A_{\text{hex}}$ (42_{dec}). Do bloku jsou přivedeny tři 8bitové sekvence. První je adresa registru, do kterého se má zapisovat a zbylé dvě jsou jeho nastavení. Registry v LDC jsou 16bitů dlouhé proto se nastavují dvěma 8bitovými zápisy. Zápis probíhá od významově nejvyššího bitu. Na obrázku 19 je vidět blok, který zapisuje do registru RESET_DEV. Příklad tohoto registru je vidět na obrázku 20.

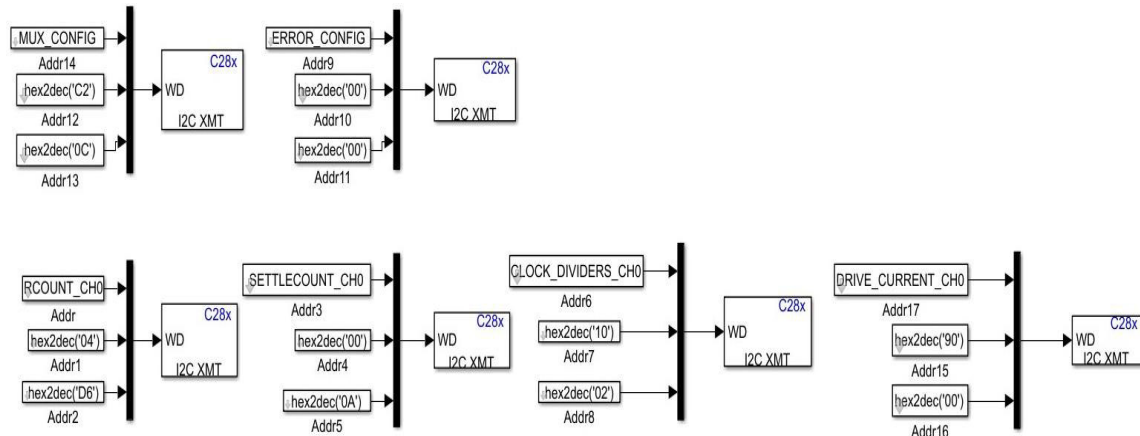


Obrázek 19 Zápis do registru RESET_DEV pomocí I2C

15	14	13	12	11	10	9	8
RESET_DEV	RESERVED						
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED							

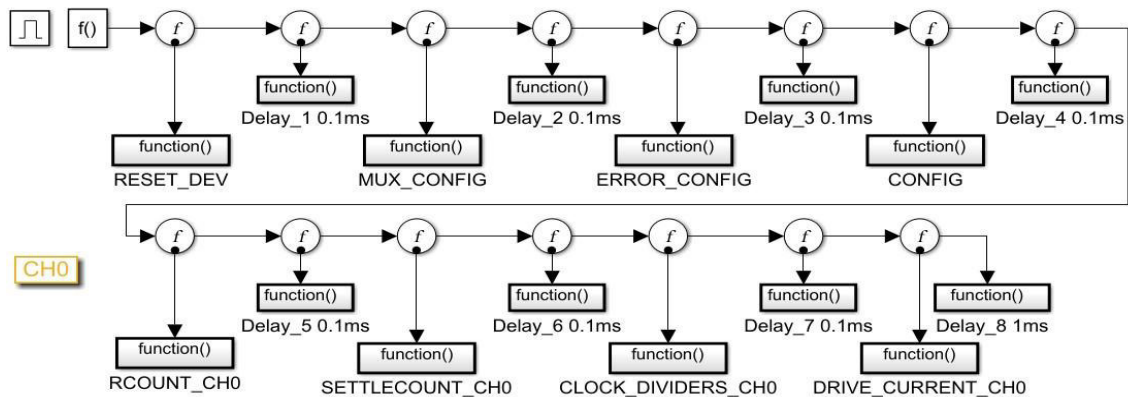
Obrázek 20 Registr RESET_DEV, Adresa 0x1C [Zdroj: [3]]

V programu Ing. Kozakoviče probíhala konfigurace registrů podle schématu na obrázku 21.



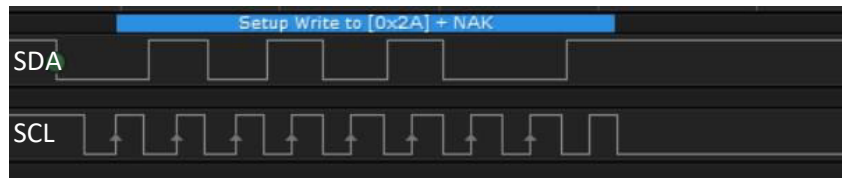
Obrázek 21 Schéma nastavení registrů od Ing. Kozakoviče [Zdroj: [4]]

Tento způsob mi přišel nevhodný, protože není dané, v jakém pořadí se mají jednotlivé komunikační kroky provést. To by mohlo vést k nestabilitě systému. Schéma zápisu jsem proto realizoval pomocí Function_call Generátoru, který zajistí, že se všechny komunikace provedou ve správném pořadí. Konečné schéma je vidět na obrázku 22.



Obrázek 22 Schéma resetu a nastavení registrů

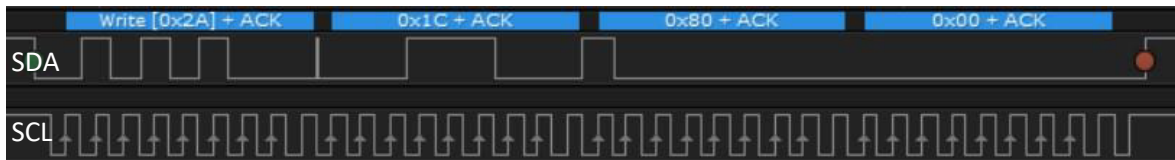
Průběh komunikace s LDC byl zaznamenán pomocí logického analyzátoru 24Mhz 8CH a programu Saleae Logic. Na obrázku 23 je vidět záznam nefunkční komunikace. Problém v toto případě plyne ze skutečnosti, že zařízení Slave (LDC) nepotvrdilo přijetí své adresy vysláním ACK bitu. Master zařízení tedy nemá komu posílat data a nepokračuje v komunikaci.



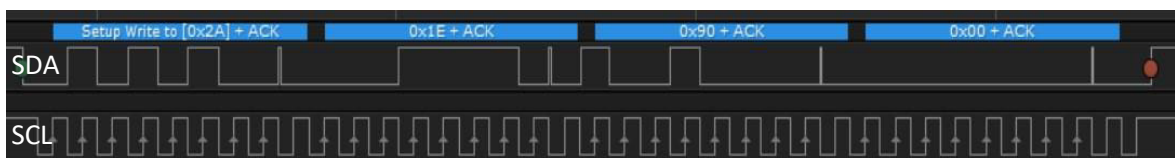
Obrázek 23 Záznam nepovedené komunikace mezi TI a LDC1614

Pro další analýzu problému jsem využil platformy Arduino Due, které jsem nastavil jako zařízení Slave s adresou 2A (stejnou jako LDC). Následně jsem monitoroval komunikaci mezi TI a Arduinem. Záznam komunikace je vidět na obrázku 24. Komunikace v této konfiguraci proběhla dle předpokladů. Jako další krok jsem se rozhodl vyzkoušet komunikaci mezi platformou Arduino Due a LDC. K tomu jsem využil skript dostupný na internetu od tvůrce Kylie Chesner¹.

Tako komunikace také proběhla v pořádku, viz obrázek 25. Nastala tak paradoxní situace, kdy TI a Arduino Due komunikovala přes I2C správně, ale v případě samostatného připojení k čipu LDC fungovala jenom varianta Arduino Due – LDC.



Obrázek 24 Záznam komunikace TI a Arduino Due

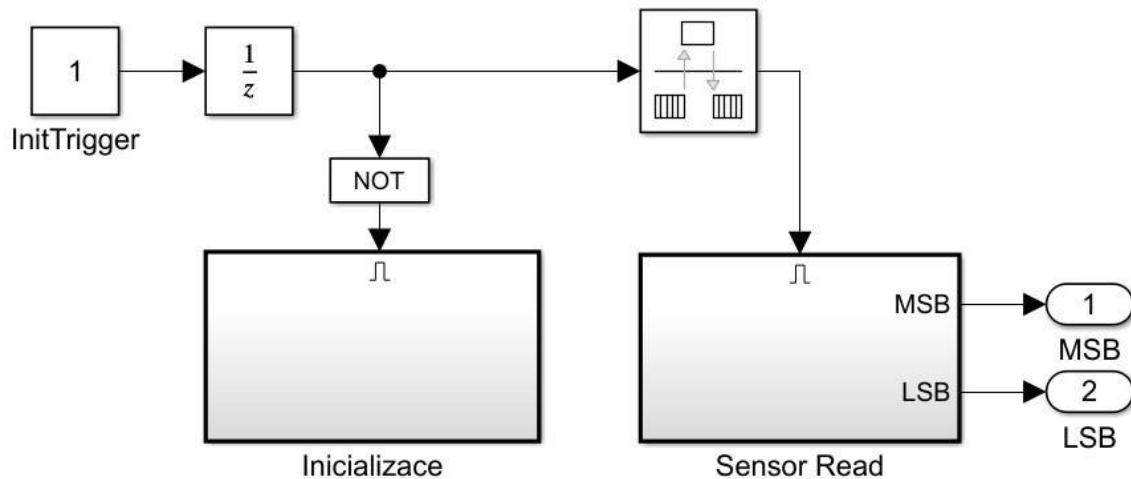


Obrázek 25 Záznam komunikace Arduino Due a LDC

Problém byl vyřešen až po dalších úpravách blokového schématu v TI. V prvním kroku bylo schéma (obrázek 18) upraveno tak, že SwitchCase blok se nikdy nepřepnul do fáze 2, a ve druhém kroku do fáze 2 přepnul, ale ta byla prázdná. Toto chování jsem si nedokázal vysvětlit, a proto jsem se rozhodl koncept se SwitchCase blokem opustit.

¹ <https://e2e.ti.com/support/sensors/f/1023/t/509982?LDC1614-Arduino-I2C>

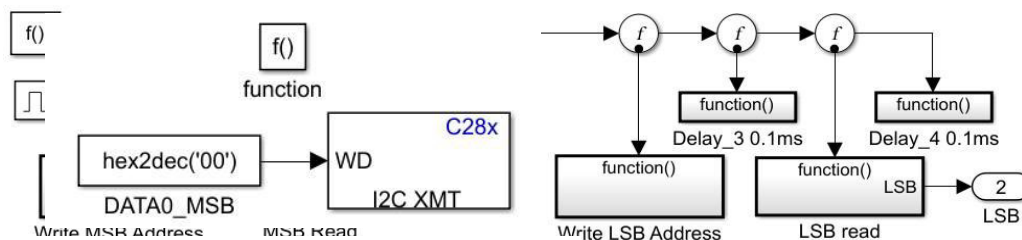
Schéma komunikace mezi TI a LDC1614 jsem přepracoval viz obrázek 26. Opět je rozdělena na dvě části Inicializace a čtení dat (Sensor Read). Blok Inicializace obsahuje stejné schéma jako je na obrázku 22. Při použití tohoto schématu fungoval zápis do registrů již bezchybně.



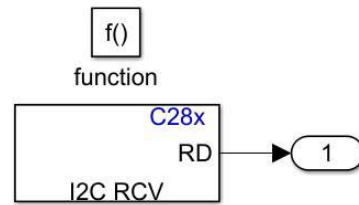
Obrázek 26 Blokové schéma komunikace mezi LDC1614 a TI F28379D verze 2

3.1.2.4. Čtení dat z registrů pomocí I2C

Sekvence pro čtení dat začíná podobě jako pro zápis dat. Začíná Master, který vyšle adresu Slave doplněnou o Write bit a následně adresu registru ze kterého chce číst. Následně ukončí komunikaci. To je pro Slave signál, že si má připravit data v daném registru k odeslání. V dalším kroku vyšle Master adresu Slave doplněnou o Read bit. V tom okamžiku začne Slave vysílat připravená data. Blok Sensor Read (na obrázku 26) obsahuje schéma, zajišťující čtení dat z registrů (obrázek 27). Čtení je opět realizováno pomocí Function_call Generátoru pro zajištění správného pořadí komunikace. V bloku Write MSB Address (obrázek 28) se za použití bloku I2C XMT vyšle adresa registru, ze kterého chceme číst. Následně se v bloku MSB READ (obrázek 29) použije blok I2C RCV pro čtení dat.



Obrázek 28 Blok Write MSB Address
Obrázek 29 Blok Sensor Read

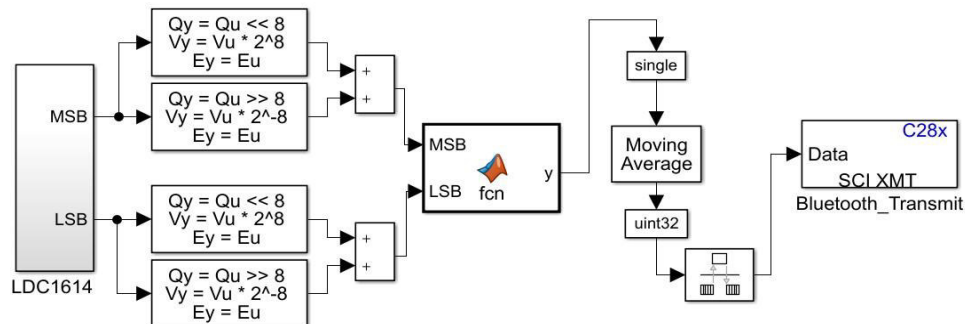


Obrázek 29 Blok MSB READ

Data, která měří LDC, mají velikost 28bitů. Kvůli své velikosti jsou rozdělena a uložena do dvou 16bitových registrů. MSB (Most Significant bit) a LSB (Least Significant bit). Při čtení dat z LDC je nutné vyčítat oba registry. Nejdříve MSB a poté LSB. Tato sekvence je vidět na obrázku 27.

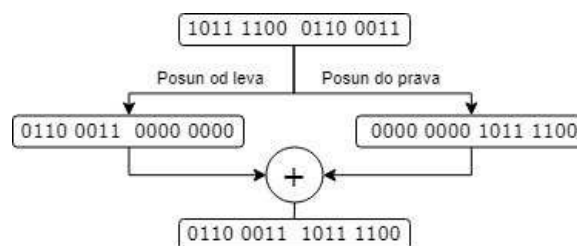
3.1.3. Úprava vyčtených dat

Před odesláním dat do počítače pomocí sériové linky implementované virtuálně přes bezdrátové spojení Bluetooth, musíme zkombinovat získaná data MSB a LSB do jednoho čísla, příslušné schéma je zobrazeno na obrázku 30.



Obrázek 30 Úprava vyčtených dat a posílání pomocí Bluetooth

Při porovnání vyčtených dat (MSB a LSB) se záznamem z logického analyzátoru měla data prohozené pořadí bajtů (místo E6_{hex} máme 6E_{hex}). Nápravu tohoto problému zajišťují dva bloky ArithShift, které posouvají bity 16bitového čísla o osm pozic doprava nebo doleva. Takto upravené 16bitové hodnoty se následně sčítají. Příklad této operace je vidět na obrázku 31.



Obrázek 31 Úprava pořadí bajtů

Následně se 16bitová data (MSB a LSB) zkombinují do jednoho 32bitového čísla. Tuto funkcionalitu zajišťuje blok Matlab_function, jehož skript je vidět na obrázku 32. Po této operaci se v bloku Moving Average vytvoří aritmetický průměr z posledních deseti hodnot. Tím se potlačí vliv náhodných výkyvů.

```
function y = fcn(MSB, LSB)
y = uint32(MSB)*2^16+uint32(LSB) ;
```

Obrázek 32 Kombinace MSB a LSB (16bit) na 32bitové číslo [Zdroj: Autor]

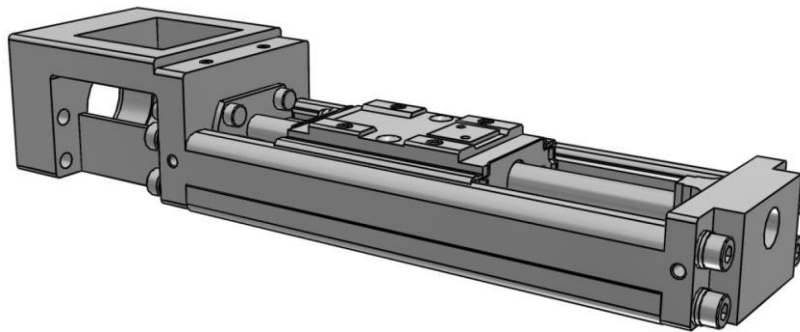
Poslední blok na schématu posílá data pomocí zařízení Bluetooth do počítače.

3.2. Přesné měření a řízení polohy

Pro moji aplikaci bylo zásadní co nejpřesnější měření polohy targetu. Polohování bylo proto zajištěno pomocí lineárního aktuátoru ve spojení se servomotorem. Dalšího významného zkvalitnění odměřování přesné polohy bylo zajištěno pomocí interferometrického odměřování viz. obrázek 47, které odstranilo závislost určování přesné polohy na optickém enkodéru servomotoru a vlivu tření v pohybovém mechanismu.

3.2.1. Lineární aktuátor KR20

Pro polohování byl využit lineární aktuátor KR 2001A-0030-0-00A0 od firmy THK, který disponuje jednostopým kuličkovým šroubem se stoupáním 1 mm a délkou zdvihu 30mm.



Obrázek 33 Lineární aktuátor KR20

3.2.2. Servomotor

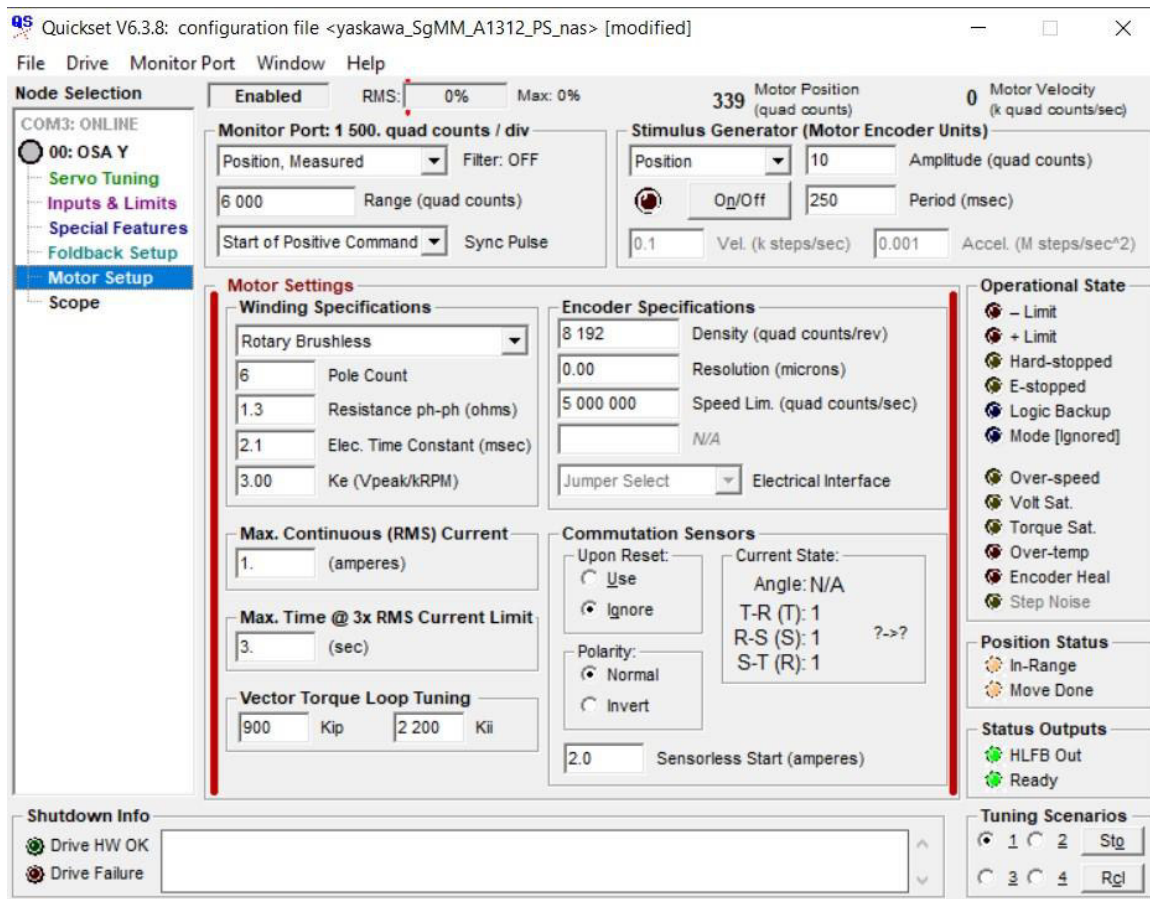
Lineární aktuátor je poháněn servomotorem SGMM-A1S312 od firmy Yaskawa. Jedná se o 6 pólový servomotor se zabudovaným enkodérem, který disponuje rozlišením 8192 kroků na otáčku. Díky tomu jsem schopen řídit aktuátor s rozlišením kroku o velikosti 0,122 μm .



Obrázek 34 Servomotor s enkodérem SGMM-A1S312

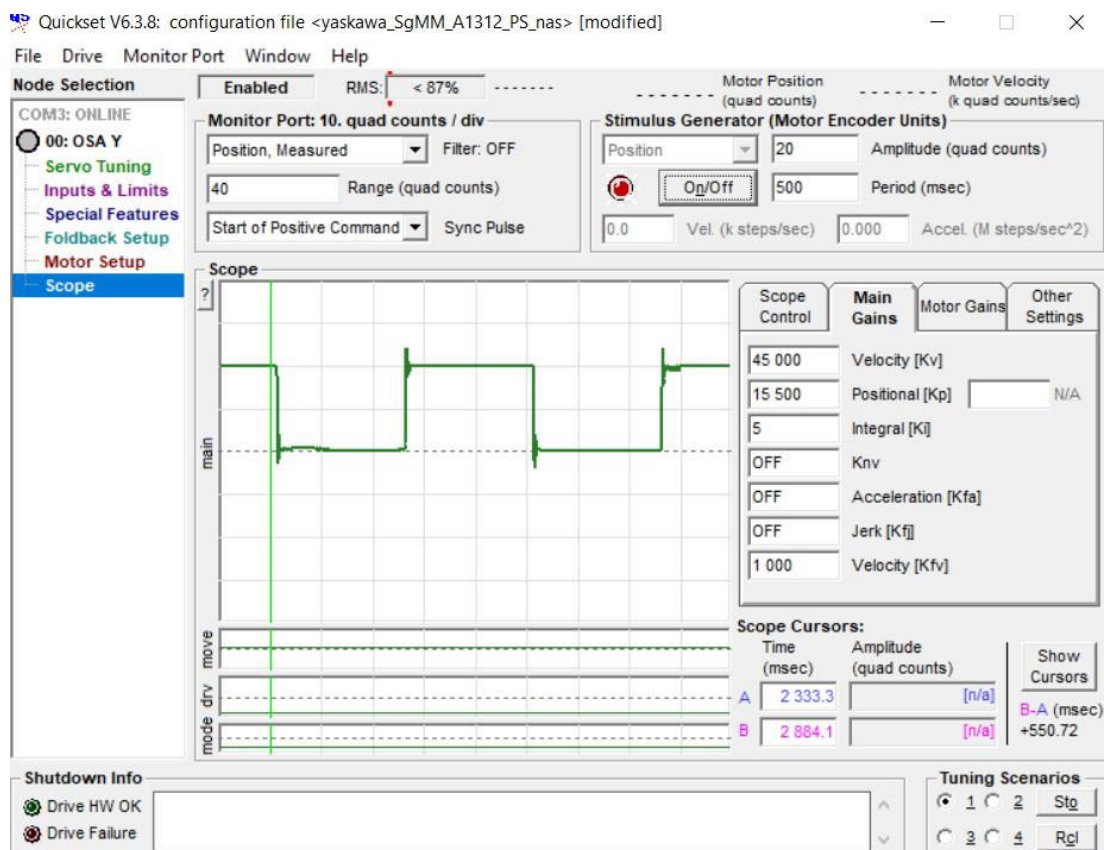
3.2.3. Servoměnič

Ovládání samotného servomotoru je realizováno pomocí servoměniče SST-1500_RCX od firmy Teknic. K nastavení měniče slouží program Quickset, který je velmi intuitivní a snadno ovladatelný. V důsledku toho, že se jedná o americký produkt, vznikají problémy s českou lokalizací. Problémem je desetinný oddělovač. V naší lokalizaci se v OS jako oddělovač používá čárka “,”, zatímco program podporuje tečku “.”. Proto je potřeba si v operačním systému přenastavit desetinný oddělovač na tečku. (Nastavení → Čas a jazyk → Další možnosti pro datum, čas, a místní nastavení → Změnit datum, čas nebo formáty čísel → další nastavení → Desetinný oddělovač - přepsat, na .) Po této úpravě se měnič v programu Quickset sám připojí a my můžeme nastavovat jeho parametry. Pro správnou funkci měniče je potřeba nastavit parametry servomotoru v záložce Motor Setup, kterou musíme zpřístupnit pro provádění změn stiskem kláves Ctrl + Shift + M. Nyní můžeme nastavit specifikace servomotoru. Pro námi použitý motor SGMM-A1S312 vypadá nastavení takto viz obrázek 35.



Obrázek 35 Nastavení parametrů pro motor SGMM-A1S312

Po nastavení specifikací motoru je potřeba nastavit PID regulátor kterým měnič ovládá servomotor s využitím zabudovaného osciloskopu pro sledování odezvy prostřednictvím Stimulus generátoru. Generátor dokáže operovat v různých režimech (pozice, rychlost, točivý moment), kdy vytváří periodický časový cyklus podle nastavených hodnot. V našem experimentu nezáleží na rychlosti posuvu ani na točivém momentu. Proto jsem při nastavování PID používal pozicový režim generátoru. V záložce Skope je vidět průběh jednotlivých kroků servomotoru a jejich překmity. Nastavováním parametrů Kv, Kp a Ki se mi podařilo eliminovat překmity při řízení motorku. Viz obrázek 36.



Obrázek 36 Nastavení parametrů PID regulátoru

K ovládání servoměniče se běžně používá Indexer/Controller.

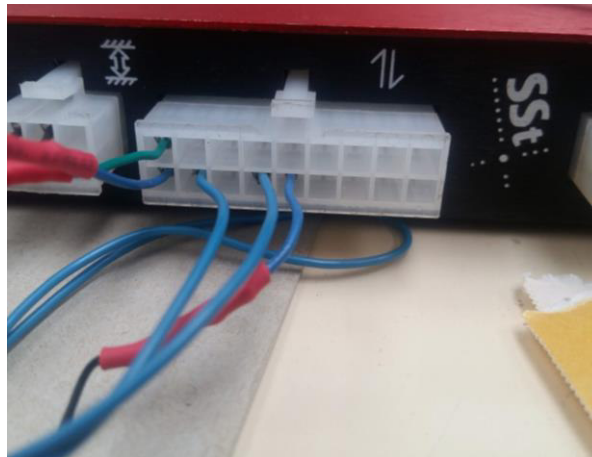
Step (pin 18) slouží k řízení kroků,

Dir (pin 9) slouží k řízení směru otáčení,

Enable (pin 8) povoluje řízení a je trvale připojen k GND (pin 6)

GND (pin 6) zem

GND (pin 5) propojené se zemí na ovládací desce. Viz obrázek 37.



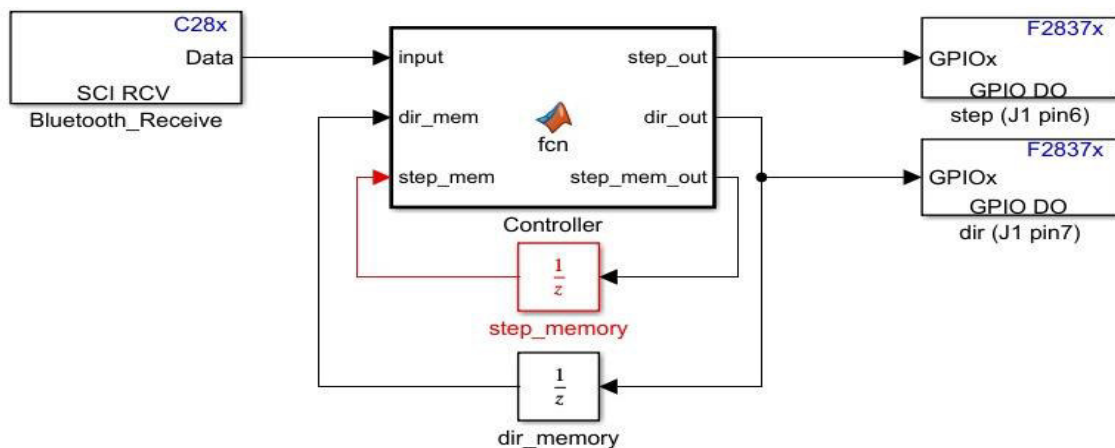
Obrázek 37 Controllerový konektor servoměniče

Program QuckSet disponuje funkcí Step Input Electronic Gearing. Pomocí této digitální převodovky jsme schopni nastavit poměr mezi vstupním step signálem a kroky, které motorek vykoná.

3.2.4. Řízení servoměniče

Servoměnič je řízen počítačem pomocí skriptu běžícím v programu Matlab. Počítač je propojen s deskou TI F28379D pomocí Bluetooth, přes který posílá desce data. Deska vyhodnotí příchozí data a následně nastaví své výstupní piny, které jsou propojeny s piny na Controllerovém konektoru servoměniče a realizují samotné řízení.

Schéma, které běží na desce, je vidět na obrázku 38. Skládá se z bloku SCI RCV (Bluetooth_Receive), který přijímá data ze zařízení Bluetooth, bloku Matlab function (Controller) ve kterém běží jednoduchý skript vyhodnocující přijatá data, dvou bloků GPIO DO (step, dir), které nastavují výstupní piny desky, a dvou bloků UnitDelay (step_memory, dir_memory), které slouží k zachování informace o předchozím stavu pinů.



Obrázek 38 Schéma řízení servoměniče

Skript běžící v bloku Controller (na obrázku 39) se skládá z if funkcí, které rozhodují, jaká hodnota byla počítačem poslána. Hodnota 20 je signál pro provedení kroku, hodnota 0 je oddělovač jednotlivých kroků, který přepíše step pin na nulu, hodnoty 40 a 41 slouží k ovládání sběru otáčení. Tímto způsobem jsme schopni z počítače přesně řídit servomotor.

```
function [step_out,dir_out,step_mem_out] = fcn(input,dir_mem,step_mem)
step_mem_out=step_mem
dir_out=dir_mem
if input==20 && step_mem==0           % nastavení step na 1, proběhne pouze jendou
    step_mem_out=single(1)
    step_out=single(1)
    return
elseif input==0                       % vynulování step_mem
    step_mem_out=single(0)
    step_out=single(0)
    return
elseif input==40                       % změna směru
    dir_out=single(1)
    step_out=single(0)
    return
elseif input==41                       % změna směru
    dir_out=single(0)
    step_out=single(0)
    return
else
    step_out=single(0)
end
```

Obrázek 39 Skript bloku Controller běžící na desce TI F28379D [Zdroj: Autor]

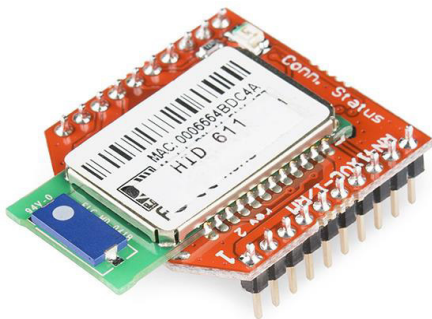
3.3. Měřicí zařízení

Měřicí zařízení se skládá z komponentů popsaných výše a dalších částí, které nebyly specifikovány v předchozích kapitolách.

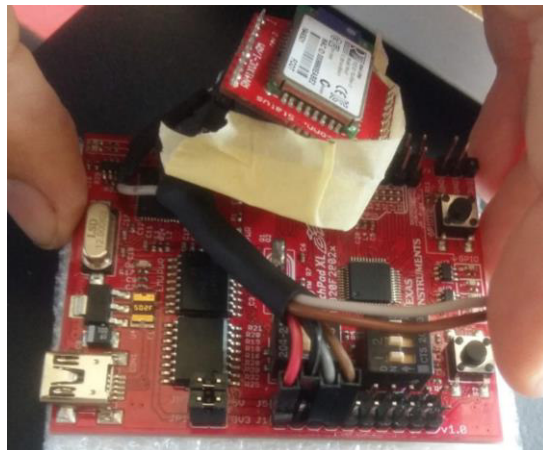
3.3.1. Zařízení Bluetooth

Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, komunikace mezi deskou TI F28379 a počítačem byla realizována pomocí zařízení Bluetooth. Na obrázku 40 je vidět použitý Bluetooth Modul RN41-XV a na obrázku 41 je vidět jeho připojení k desce TI F28027, kterou jsem používal při vývinu aplikace.

5



Obrázek 40 Bluetooth modul RN41-XV

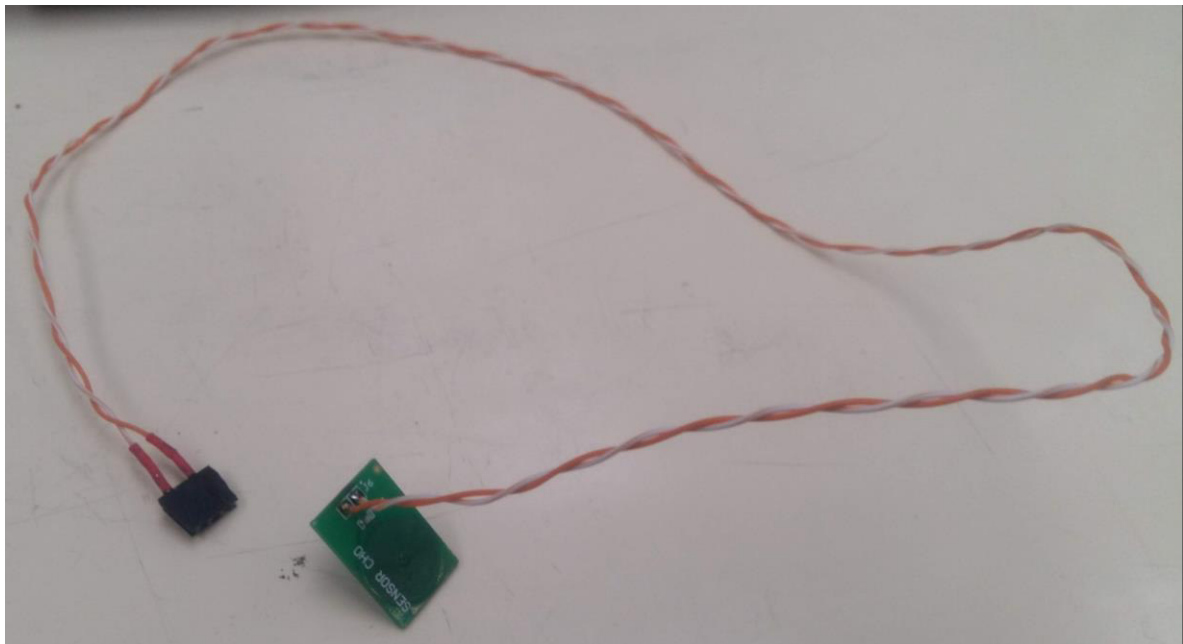


Obrázek 41 Propojení RN41-XV s deskou TI F28027

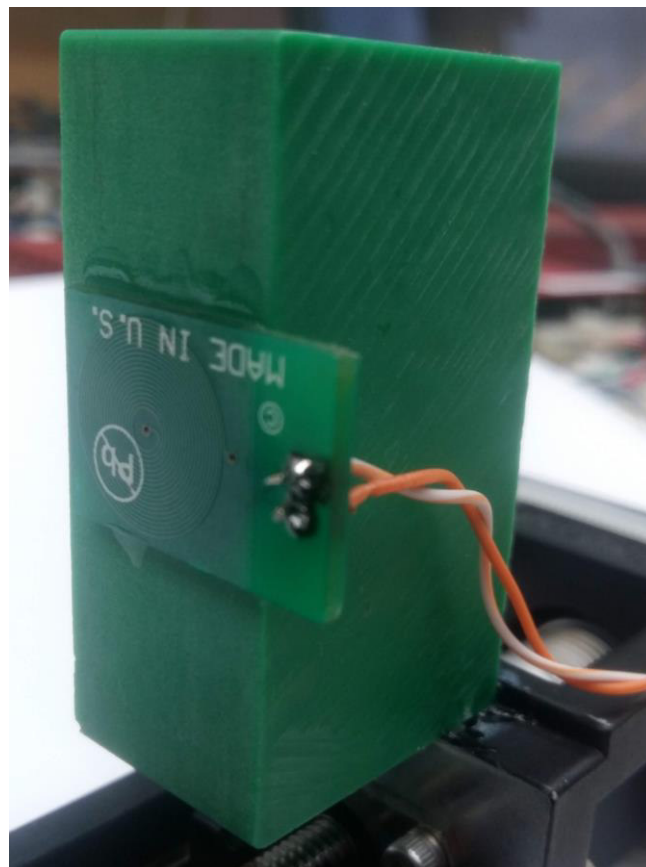
3.3.2. Měřicí Induktor

Pro měření jsem použil jeden z induktorů nacházejících se na modulu LDC1614EVM. Pro snazší manipulaci jsem induktor odlomil a pomocí připájené dvoulinky opět připojil k LDC1614EVM. Induktor disponuje kondenzátorem o kapacitě 330 pF a dvouvrstvou cívkou s vnějším průměrem $D_{coil} = 13,9$ mm, 19 závitů a šířkou stopy a mezery 0,15 mm. Pro určení vlastní frekvence senzoru jsem použil kalkulátor dostupný na internetu². Hledaná frekvence senzoru vyšla $f_{SENSOR} = 2792.59$ kHz. Na obrázku 42 je vidět odlomená cívka s připojovacími kabelem a na obrázku 43 je detail upevnění. Bylo zjištěno, že poměr $d_{IN}/d_{OUT} = 0.18$ této cívky nespĺňuje doporučení pro dosažení optimálního faktoru kvality Q ($d_{IN}/d_{OUT} > 0,3$).

² <http://webench.ti.com/wb5/LDC/#/spirals>



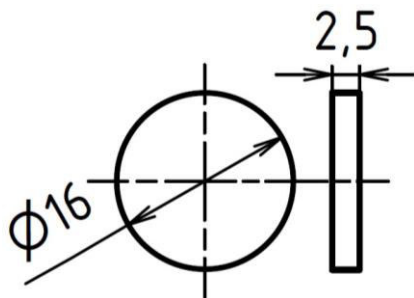
Obrázek 42 Odlomený induktor s přípojovacími kabely



Obrázek 43 Detail upevnění senzoru na konstrukci

3.3.3. Target

Target pro tuto aplikaci jsem si vyráběl ohledem na teorii popsanou v první části této práce. Za materiál jsem vybral hliník pro jeho dobrou vodivost, ale hlavně snadnou obrobitelnost. Rozměry targetu jsem určoval na základě specifikací měřicí cívky (viz kapitola 3.3.2). Pro výpočet hloubky vniku (δ) jsem použil kalkulátor dostupný na internetu³. Po zadání materiálu a frekvence senzoru vyšla hloubka vniku $\delta = 49.1 \mu\text{m}$. Z té jsem určil minimální tloušťku targetu $h_{\text{min}} = 3 * \delta = 147.3 \mu\text{m}$. Díky malé hodnotě h_{min} jsem se nemusel bát jejího nedodržení, a proto jsem zvolil tloušťku targetu $h = 2,5 \text{ mm}$. Průměr targetu D_{target} jsem zvolil o něco větší než průměr cívky D_{coil} . Tato volba omezuje vliv axiální nesouososti targetu a cívky. $D_{\text{target}} = 16 \text{ mm}$. Nákres a vyrobený target je vidět na obrázku 44 a 45.



Obrázek 44 Rozměry targetu



Obrázek 45 Vyrobený target

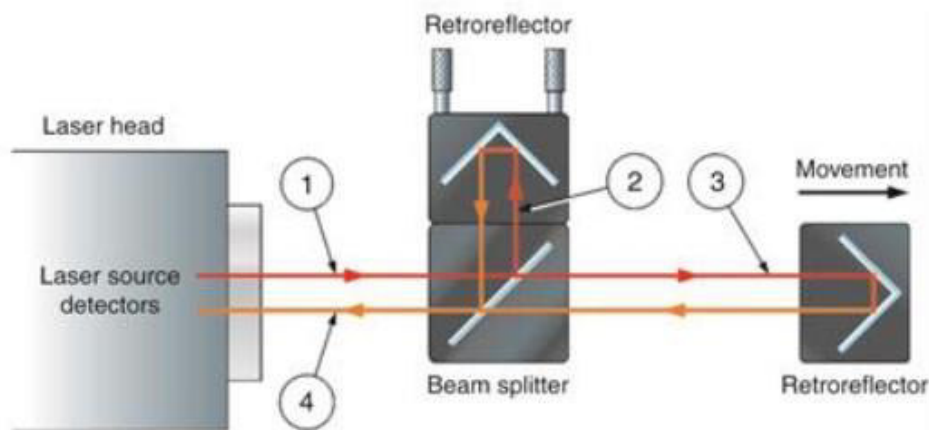
3.3.4. Interferometr

Při polohování targetu použitím aktuátoru poháněného servomotorem dochází k nepřesnostem v nastavovaných polohách. Tyto odchylky od požadovaných poloh jsou způsobeny mechanickými nedokonalostmi konstrukce a negativně ovlivňují naměřená data. Pro korekci pozic naměřených dat jsem v tomto experimentu použil interferometr.

Interferometr je přístroj pro velmi přesná měření, jehož princip je založen na interferenci světla. Princip měření je vyobrazen na obrázku 46. Z interferometru vychází paprsek (1) a vstupuje do rozdělovače paprsků, kde se odrazí/projde skrz polopropustné zrcadlo. Větev paprsku (2) se odrazí od zrcadel a míří zpět do interferometru. Paprsek (3) putuje k odražeči, který je připevněn na měřeném zařízení, zde se odrazí a putuje zpět do interferometru. V úseku (4) se oba paprsky spojují a interferují mezi sebou. Pokud jsou

³ <https://www.pasternack.com/t-calculator-skin-depth.aspx>

paprsky ve fázi, výsledná amplituda se zesílí. Při posuvu odražeče se mění vzdálenost, kterou urazil paprsek (3). Tím se posouvá vůči paprsku (2) a složený paprsek (4) mění svoji intenzitu. Pokud se paprsek posune o polovinu vlnové délky λ , paprsky se navzájem vyruší. Interferometr vyhodnocuje příchozí paprsek a měří tak změny poloh targetu s vysokou přesností. V tomto experimentu byl použit interferometr ML10 společně s enviromentálním kompenzátorem EC10. Viz obrázek 47. Díky použitému interferometru jsem mohl korigovat polohy targetu s přesností $0,001 \mu\text{m}$.



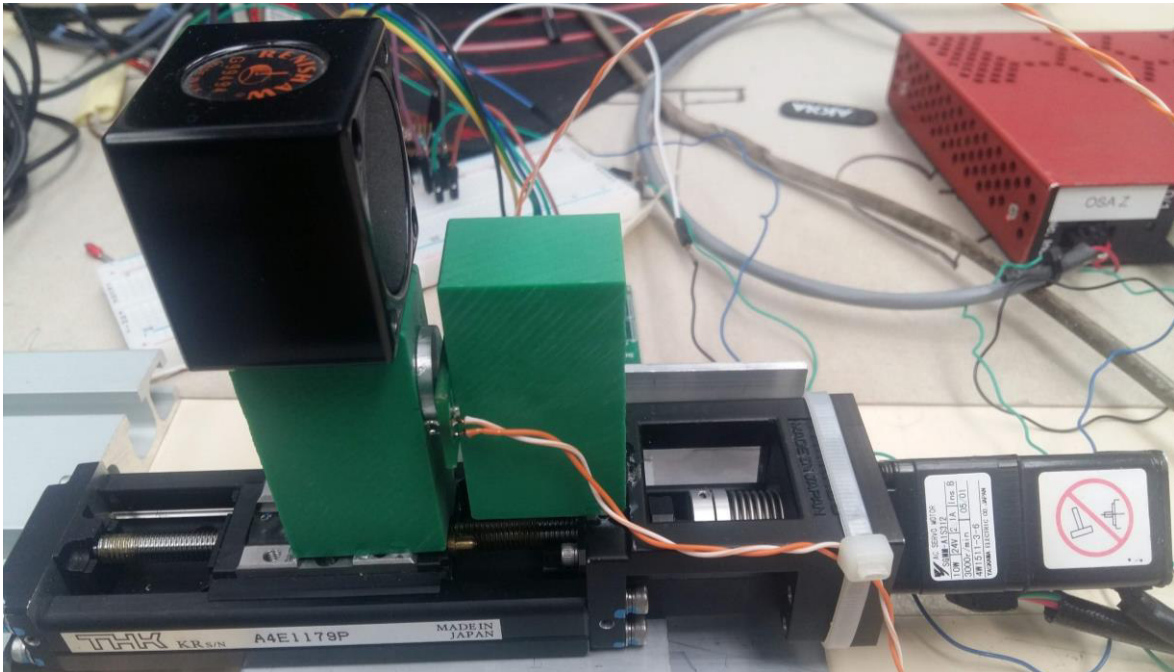
Obrázek 46 Princip interferometru



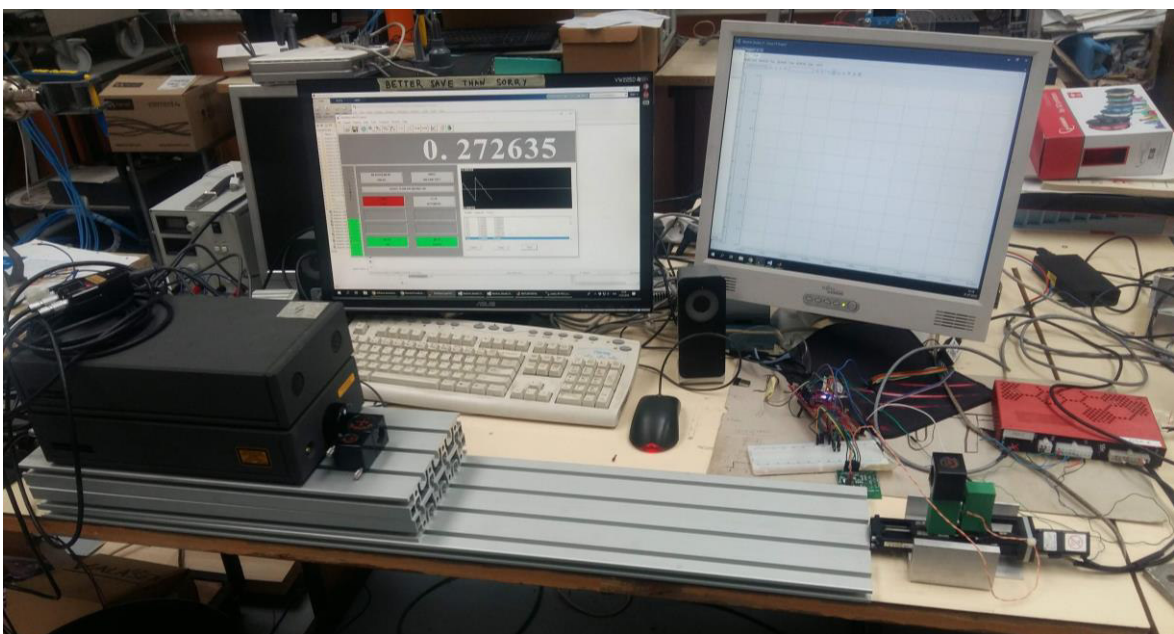
Obrázek 47 Interferometr ML10 a enviromentální kompenzátor EC10

3.3.5. Konstrukce měřicí soustavy

Na obrázku 48 je měřicí soustava. Zelené bloky, ke kterým jsou připevněny senzor a target, jsou z nevodivého materiálu. Slouží k vytvoření mezery mezi senzorem a kovovým aktuátorem, který by zkresloval měření. K bloku s targetem je také připevněn odražeč interferometru.



Obrázek 48 Měřicí soustava

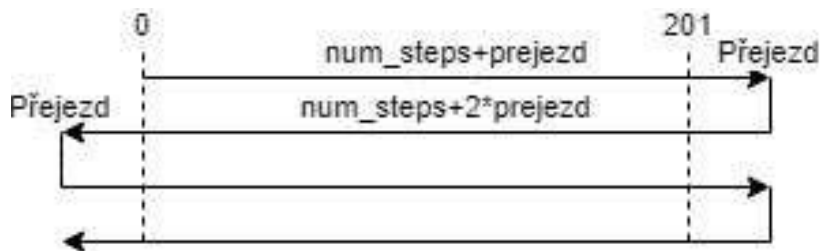


Obrázek 49 Měřicí soustava

3.4. Ovládání experimentu

Celé měření je ovládáno řídicím skriptem běžícím na počítači v programu Matlab. Nejprve dojde k propojení počítače se zařízením Bluetooth. Následně se nastaví parametry měření. Počet chodů, kroků a velikost přejezdů. Podle těchto údajů se připraví matice pro zápis měřených dat.

Na obrázku 50 je znázorněna sekvence měření. Z obrázku je patrné, že první chod měření zahrnuje pouze jeden přejezd, a proto je kratší než následující chody. Proto je řídicí skript rozdělen na dvě sekvence řízení posuvů.



Obrázek 50 Průběh měření

Na obrázku 51 je vidět řízení prvního chodu. Nejdříve se získají data o počáteční poloze a vyšle se údaj o směru otáčení. Poté začne funkce „for“ vysílat instrukce o provedení kroku následované měřením dat.

```

flushinput (bt)
U(1,1+prejezd)=fread(bt,1,'uint32')
pause(2);
dir=41;
fwrite(bt,uint8(dir));
for n=2+prejezd:num_steps+1+2*prejezd
    fwrite(bt,uint8(20));
    pause(1);
    fwrite(bt,uint8(0));
    pause(4);
    flushinput(bt);
    U(1,n)=fread(bt,1,'uint32')
    pause(0.5);
end

```

Obrázek 51 Sekvence prvního chodu

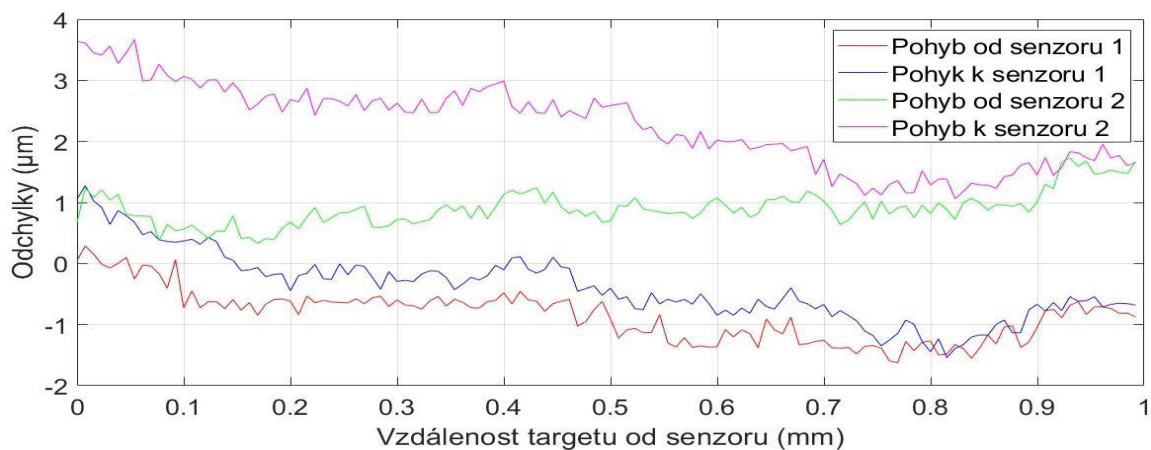
Následující chody využívají velmi podobný skript, který je doplněný o reverzaci směru otáčení. Celý řídicí skript se nachází v příloze 1.

3.5. Zpracování dat

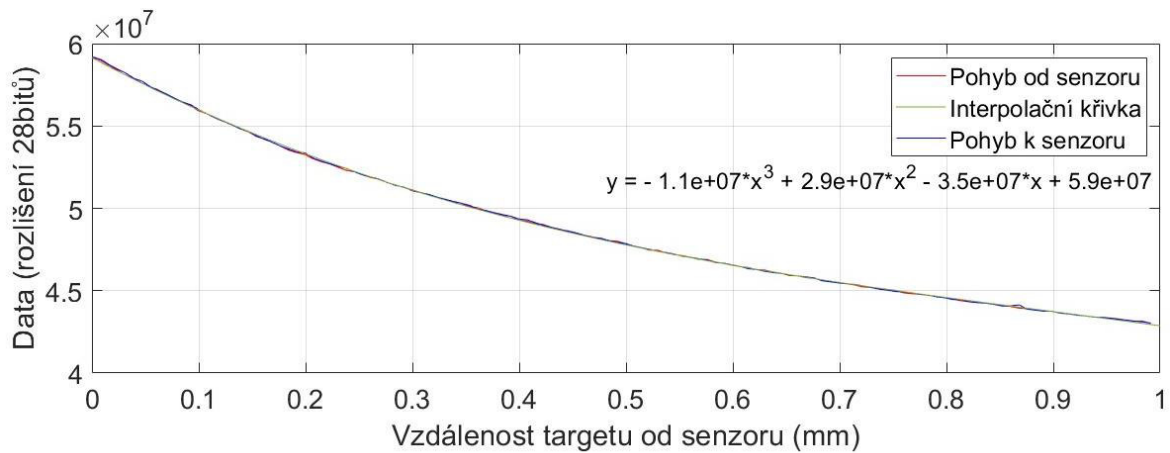
Provedl jsem dvě skupiny měření, které se lišily počtem chodů, velikostí kroků a zároveň počtem měřených poloh.

3.5.1. První měření

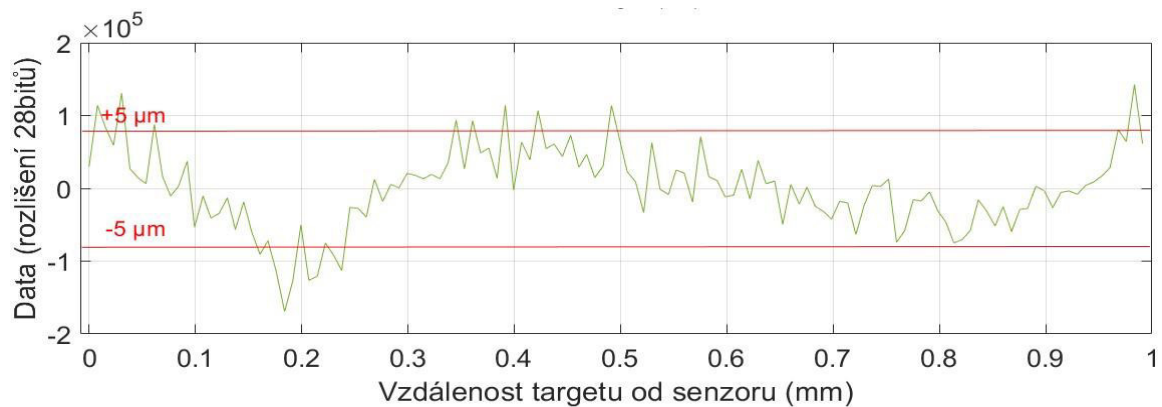
V prvním měření jsem provedl deset chodů s kroky o velikosti $7,690 \mu\text{m}$ a zaznamenal 130 poloh. Target urazil při tomto nastavení v jednom chodu vzdálenost $0,992 \text{ mm}$. Měření bylo plánováno pro 10 chodů. Bohužel po čtvrtém chodu přestal interferometr měřit z nezjištěného důvodu přesné polohy targetu. Proto jsem dále zpracovával naměřená data ze senzoru jen pro první čtyři chody, pro která byla data o polohách z interferometru v pořádku. Na grafu 9 jsou vidět odchylky od požadovaných poloh targetu naměřené interferometrem. S každým chodem se tyto odchylky zvětšovali, a to je známkou špatné opakovatelnosti aktuátoru. Pomocí těchto odchylek jsem upravil polohy, ve kterých se skutečně provádělo měření. Naměřená data ze senzoru vztažená k upraveným polohám targetu jsou vidět na grafu 10 a jsou proložena interpolační křivkou pomocí Matlabu. Hodnoty digitalizované indukčnosti ze senzoru se pro toto měření pohybovaly v hodnotách od $43,010 \cdot 10^6$ do $59,187 \cdot 10^6$. Při vydělení tohoto rozsahu ($16,177 \cdot 10^6$) počtem kroků (130) získáme přibližné rozlišení jednoho kroku $1.244 \cdot 10^5$ (neodpovídá skutečnosti, pro tento výpočet se předpokládá lineární funkce průběhu indukčnosti na vzdálenosti). Na grafu 11 jsou zaznamenány odchylky naměřených dat od interpolační křivky. Vidíme, že se odchylky pohybují v rozmezí $\pm 1,5 \cdot 10^5$ a většinou nepřesahují $1 \cdot 10^5$. Odchylky se tedy přibližně rovnají rozlišení čili jsme schopni měřit s přesností jednoho kroku tj. $7,690 \mu\text{m}$.



Graf 9 Odchylky od požadovaných poloh targetu



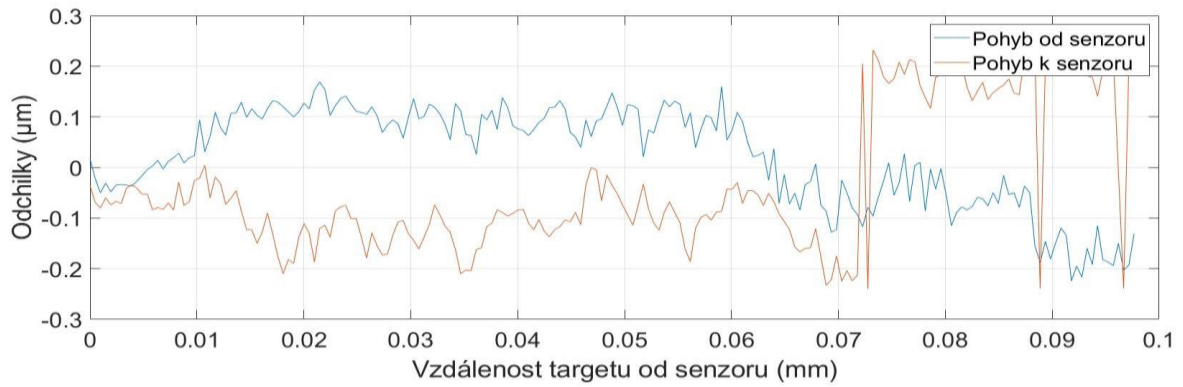
Graf 11 Indukčnost senzoru v závislosti na poloze targetu



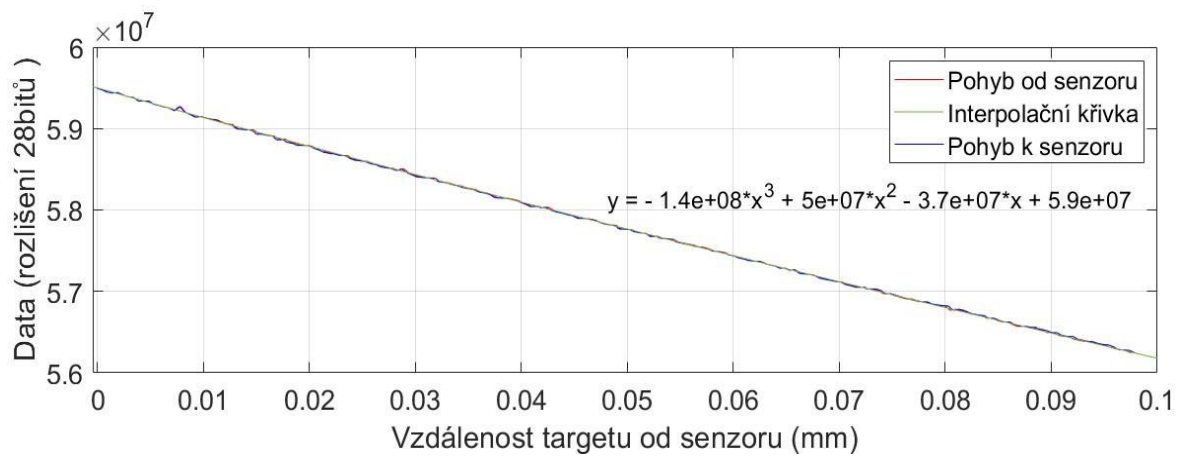
Graf 10 Odchylky od interpolační křivky

3.5.2. Druhé měření

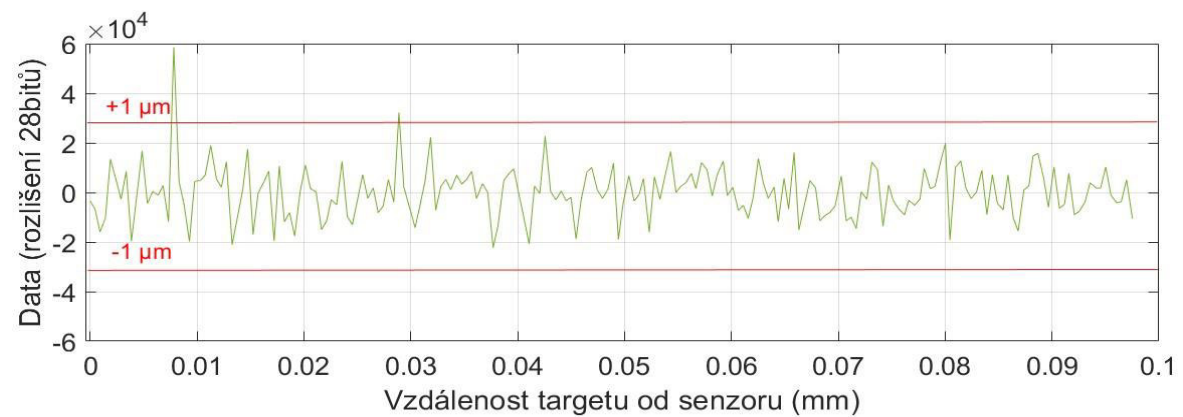
Kvůli časové náročnosti jsem v druhém měření provedl pouze dva chody s kroky o velikosti $0,488 \mu\text{m}$ a zaznamenal jsem 201 poloh. Target urazil při tomto nastavení v jednom chodu vzdálenost $98,1445 \mu\text{m}$. Na grafu 12 jsou vidět odchylky po požadovaných poloh targetu. Naměřená data ze senzoru vztažená k upraveným polohám targetu jsou vidět na grafu 13 a jsou proložena interpolační křivkou pomocí Matlabu. Hodnoty digitalizované indukčnosti ze senzoru se pro toto měření pohybovaly v hodnotách od $53,243 \cdot 10^6$ do $59,494 \cdot 10^6$. Při vydělení tohoto rozsahu ($3,250 \cdot 10^6$) počtem kroků (200) získáme rozlišení jednoho kroku $1,6253 \cdot 10^4$. Na grafu 14 jsou zaznamenány odchylky naměřených dat od interpolační křivky. Vidíme, že se odchylky se pohybují v rozmezí $\pm 2 \cdot 10^4$ a v jednom místě dosahují hodnoty $6 \cdot 10^4$. Odchylky jsou v tomto případě lehce větší než rozlišení kroků a jsme schopni měřit s přesností $0,600 \mu\text{m}$.



Graf 12 Odchylky od požadovaných poloh targetu



Graf 13 Indukčnost senzoru v závislosti na poloze targetu



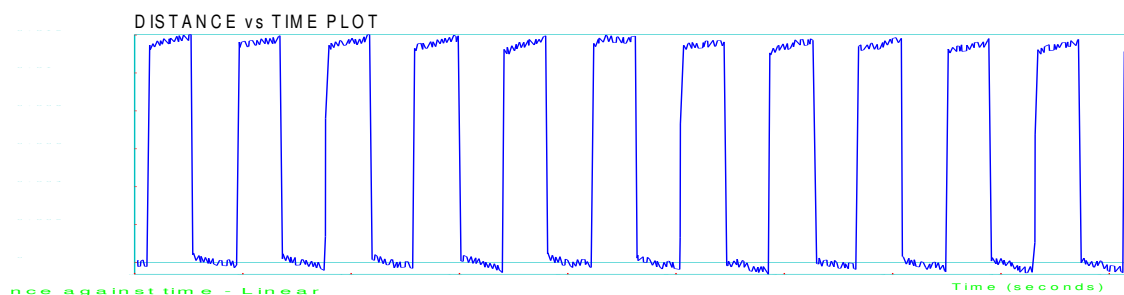
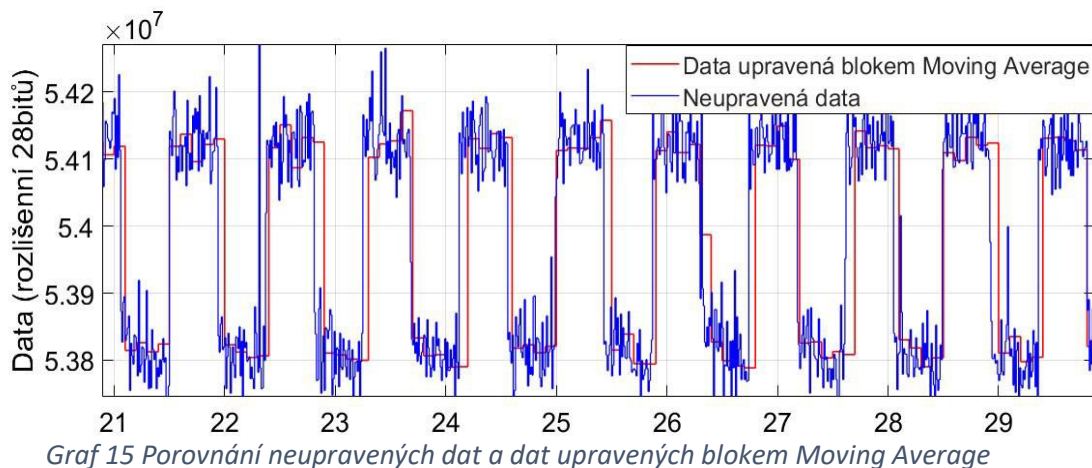
Graf 14 Odchylky od interpolační křivky

3.6. Zhodnocení měření

Měřicí vlastnosti senzoru se hodnotí dle několika parametrů: přesnosti, měřicího dosahu, opakovatelnosti, teplotní stability a neposlední řadě též ceny.

U prvního měření, kde pro úpravu dat nebylo využito průměrování (schema na obrázku 30), je zjevný významný rozptyl měřených dat.

Cílem následujícího měření bylo prokázat významný přínos průměrování měřených dat. Měření bylo prováděno následujícím způsobem: Lineární aktuátor periodicky přemísťoval target o ca. 12 μm . Základní měření polohy bez průměrování (graf 15 – Neupravená data) probíhalo na frekvenci 1kHz s následným průměrováním prostřednictvím bloku Moving Average průměrujícího posledních 10 naměřených vzorků (grafu 15 - Moving Average). Z výsledků je zjevné zlepšení rozlišení měřené polohy výměnou za horší dynamiku měřené polohy (fázová zpoždění měřené veličiny). Graf 16 zobrazuje korespondující záznam přesných poloh targetu naměřený pomocí interferometru. Celkově lze z experimentálně naměřených dat konstatovat, že šum polohy u neprůměrovaných hodnot odpovídá přibližně $\pm 2.5 \mu\text{m}$, zatímco u 10x průměrovaných dat jen $\pm 0.6 \mu\text{m}$.



Další vlastností, kterou je nutné zhodnotit, je efektivní měřicí dosah senzoru. V provedeném experimentu za použití cívky o průměru 13,9 mm bylo dosaženo měřicího rozsahu okolo 2 mm. To je vzhledem k specifikacím čipu LDC1614 velmi neuspokojivý výsledek. Dle katalogových hodnot by mělo být možné počítat se vzdálenostním rozsahem přibližně jednonásobku vnějšího průměru cívky. Příčinou takto malého měřicího rozsahu může být nevhodné nastavení řídicích registrů pro použitou cívku, nebo vliv špatné kompenzace propojovacího vodiče mezi cívkou a čipem LDC1614. Tato skutečnost bude předmětem dalšího zkoumání.

Opakovatelnost senzoru se v tomto experimentu nedá spolehlivě určit. U Měření obsahující více měřících cyklů nebyl interferometr schopen zaznamenat data ve všech měřených polohách.

Experimenty pro zkoumání teplotní stability senzoru nebyly z důvodů časové náročnosti a potřeby teplotně kontrolované komory realizovány.

Ze změřených dat byla vytvořena kubická interpolační křivka, kterou je možné využít pro následnou kalibraci čidla (linearizaci měřených dat).

4. Závěr

Cílem této bakalářské práce byla integrace čidla LDC1614 do prostředí Matlab/Simulink s jeho následnou kalibrací a evaluací jeho celkových měřicích vlastností. V první části práce byla provedena rešerše na téma měření polohy pomocí vířivých proudů.

V druhé (praktické) části byla popsána realizace propojení sensoru s prostředím Matlab/Simulink a komunikace přes sběrnici I2C a mikrokontrolerem Texas Instruments F28379D. Programování mikrokontroleru bylo realizováno pomocí programu Matlab/Simulink. V práci je také popsána realizace řízení lineárního aktuátoru pro experimentální vyhodnocování měřicích charakteristik sensoru LDC1614.

Výstupem práce je tak experimentální zařízení pro kalibraci sensoru polohy založeném na principu vířivých proudů a realizovaném specificky prostřednictvím sensoru LDC1614. Z naměřených dat byla získána kubická interpolační křivka, která může být následně využita k linearizaci měřených dat.

Práce vyžadovala velké množství experimentální dovedností a představovala pro mne velmi cenný zdroj zkušeností jak teoretických, tak praktických. Z časových a realizačních důvodů nebylo možno provést experimenty zkoumající závislost měřené polohy na teplotě. Tato skutečnost však v žádném případě nezmenšuje praktický přínos realizované práce a získané výsledky budou v rámci dalších experimentů znovu verifikovány a rozšířeny.

Závěrem lze konstatovat, že práce naplnila a v některých oblastech významně překročila cíle stanovené zadáním a představuje odrazový můstek pro realizaci velkého množství mechatronických experimentů s využitím výše popsaného sensoru.

Seznam použité literatury

- [1] *LDC Target Design [online]. Texas Instruments, 2016 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa957a/snoa957a.pdf>*
- [2] *LDC Sensor Design [online]. Texas Instruments, 2016 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa930a/snoa930a.pdf>*
- [3] LDC1612, LDC1614 Multi-Channel 28-Bit Inductance to Digital Converter (LDC) for Inductive Sensing [online]. Texas Instruments [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1614.pdf>
- [4] RADKO, Kozakovič a Kertész MILAN. VNORENÝ SENZORICKÝ SYSTÉM POLOHY MAGNETICKY LEVITUJÚCEHO HRIADEĽA [online]. [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/105008304-Vnorenny-senzoricky-system-polohy-magneticky-levitujuceho-hriadela.html>

Seznam grafů

Graf 1 Hĺoubka vniku (skin depth) v závislosti na frekvenci pro různé vodiče [Zdroj: [1]]	3
Graf 2 Indukovaný proud v závislosti na tloušťce vodiče [Zdroj: [1]]	4
Graf 3 Porovnání posunu frekvence senzoru v závislosti na vzdálenosti pro různé materiály targetu [Zdroj: [1]].....	7
Graf 4 Změna indukčnosti pro různé materiály targetu v závislosti na frekvenci senzoru [Zdroj: [1]]	8
Graf 5 Frekvence senzoru v závislosti na kapacitanci a indukčnosti [Zdroj: [2]].....	9
Graf 6 Indukčnost v závislosti na počtu závitů pro 18 mm kruhovou cívku [Zdroj: [2]]	14
Graf 7 Závislost R_p na vzdálenosti vztažené na průměr (pro $d_{OUT} = 14$ mm) [Zdroj: [2]]	16
Graf 8 Závislost Indukčnosti na vzdálenosti vztažené na průměr (pro $d_{OUT} = 14$ mm) [Zdroj: [2]]	16
Graf 9 Odchylky od požadovaných poloh targetu	39
Graf 10 Odchylky od interpolační křivky	40
Graf 11 Indukčnost senzoru v závislosti na poloze targetu	40
Graf 12 Odchylky od požadovaných poloh targetu	41
Graf 13 Indukčnost senzoru v závislosti na poloze targetu	41
Graf 14 Odchylky od interpolační křivky	41
Graf 15 Porovnání neupravených dat a dat upravených blokem Moving Average	42
Graf 16 Záznam periodického posunu targetu pomocí interferometru.....	42

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>LDC</i>	<i>LDC1614</i>
<i>TI</i>	<i>Texas Instruments F28379D Launchpad</i>
<i>I2C</i>	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
<i>PCB</i>	<i>Printed Circuit Board</i>
<i>SCL</i>	<i>Synchronous Clock</i>
<i>SDA</i>	<i>Synchronous Data</i>
<i>Ack</i>	<i>acknowledge bit</i>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vzájemné působení střídavého magnetického pole a vodiče [Zdroj: [1]]	2
Obrázek 2 Tok proudu v jednotném povrchu a v povrchu s trhlinou [Zdroj: [1]]	5
Obrázek 3 Boční/Lineární tvar targetu nad senzorem [Zdroj: [1]]	5
Obrázek 4 Boční /Lineární target s proměnným profilem [Zdroj: [1]]	6
Obrázek 5 Sériová a Paralelní reprezentace ztrát [Zdroj: [2]]	10
Obrázek 6 RLC model [Zdroj: [2]]	11
Obrázek 7 Axiální posuv s kruhovým induktorem [Zdroj: [2]]	11
Obrázek 8 Obdélníková cívka necitlivá na posun v ose y [Zdroj: [2]]	12
Obrázek 9 Plochá spirální kruhová cívka [Zdroj: [2]]	13
Obrázek 10 Konstrukce vícevrstvého induktoru [Zdroj: [2]]	14
Obrázek 11 Vzájemná indukce pro dvouvrstvý induktor [Zdroj: [2]]	15
Obrázek 12 Parazitické kondenzátory v induktoru [Zdroj: [2]]	17
Obrázek 13 LDC1614EVM	19
Obrázek 14 I2C – Sekvence zápisu do registru [Zdroj: [3]]	20
Obrázek 15 I2C – Sekvence čtení z registru [Zdroj: [3]]	20
Obrázek 16 Propojení LDC1614 a TI F28379D	21
Obrázek 17 Blokové schéma komunikace mezi LDC1614 a TI F28335 [Zdroj: [4]]	21
Obrázek 18 Blokové schéma komunikace mezi LDC1614 a TI F28379D	22
Obrázek 19 Zápis do registru RESET_DEV pomocí I2C	22
Obrázek 20 Registr RESET_DEV, Adresa 0x1C [Zdroj: [3]]	22
Obrázek 21 Schéma nastavení registrů od Ing. Kozakoviče [Zdroj: [4]]	23
Obrázek 22 Schéma resetu a nastavení registrů	23
Obrázek 23 Záznam nepovedené komunikace mezi TI a LDC1614	24
Obrázek 24 Záznam komunikace TI a Arduino Due	24
Obrázek 25 Záznam komunikace Arduino Due a LDC	24
Obrázek 26 Blokové schéma komunikace mezi LDC1614 a TI F28379D verze 2	25
Obrázek 27 Blok Sensor Read	25
Obrázek 29 Blok MSB READ	26
Obrázek 28 Blok Write MSB Adress	25
Obrázek 30 Úprava vyčtených dat a posílání pomocí Bluetooth	26
Obrázek 31 Úprava pořadí bajtů	26
Obrázek 32 Kombinace MSB a LSB (16bit) na 32bitové číslo [Zdroj: Autor]	27
Obrázek 33 Lineární aktuátor KR20	28
Obrázek 34 Servomotor s enkodérem SGMM-A1S312	28
Obrázek 35 Nastavení parametrů pro motor SGMM-A1S312	29
Obrázek 36 Nastavení parametrů PID regulátoru	30
Obrázek 37 Controllerový konektor servoměniče	31
Obrázek 38 Schéma řízení servoměniče	31
Obrázek 39 Skript bloku Controller běžící na desce TI F28379D [Zdroj: Autor]	32
Obrázek 40 Bluetooth modul RN41-XV	33
Obrázek 41 Propojení RN41-XV s deskou TI F28027	33
Obrázek 42 Odlomený induktor s připojovacími kabely	34
Obrázek 43 Detail upevnění senzoru na konstrukci	34
Obrázek 45 Vyrobený target	35
Obrázek 44 Rozměry targetu	35
Obrázek 46 Princip interferometru	36
Obrázek 47 Interferomet ML10 a enviromentální kompenzátor EC10	36
Obrázek 48 Měřící soustava	37
Obrázek 49 Měřící soustava	37



Obrázek 50 Průběh měření	38
Obrázek 51 Sekvence prvního chodu.....	38

Seznam příloh

Příloha I. Skript pro řízení a měření polohy targetu

PŘÍLOHA I: Skript pro řízení a měření polohy targetu

```
1 clear all
2
3 bt = Bluetooth('RNBT-ABE2', 1);
4 bt.InputBufferSize=4;
5 bt.OutputBufferSize=4;
6 bt.Timeout=10000;
7 fopen(bt);
8
9 pocet_chodu=10;
10 num_steps = 200;
11 prejezd=10;
12 U=zeros(num_chodu,num_steps+1 + 2*prejezd);
13
14
15
16 flushinput(bt)
17 U(1,1+prejezd)=fread(bt,1,'uint32')
18 pause(2);
19 dir=41;
20 fwrite(bt,uint8(dir));
21 for n=2+prejezd:num_steps +1 + 2*prejezd
22     fwrite(bt,uint8(20));
23     pause(1);
24     fwrite(bt,uint8(0));
25     pause(4);
26     flushinput(bt);
27     U(1,n)=fread(bt,1,'uint32')
28     pause(0.5);
29 end
30
31 dir=40
32 fwrite(bt,uint8(dir));
33 for i=2:pocet_chodu
34     flushinput(bt);
35     U(i,1)=fread(bt,1,'uint32')
36     pause(2);
37
38     for n=2:num_steps +1 + 2*prejezd
39         fwrite(bt,uint8(20));
40         pause(1);
41         fwrite(bt,uint8(0));
42         pause(4);
43         flushinput(bt);
44         U(i,n)=fread(bt,1,'uint32')
45         pause(0.5);
46     end
47     if dir==41
48         dir=40
49     else
50         dir=41
51     end
52 end
53 fclose(bt);
54 delete(bt);
55 clear(bt);
56
```